



HAL
open science

Mobilités quotidiennes et crues éclair : Une rencontre à haut risque !

Isabelle Ruin

► **To cite this version:**

Isabelle Ruin. Mobilités quotidiennes et crues éclair : Une rencontre à haut risque!. Environnement et Société. Université Grenoble Alpes, 2020. tel-03092999

HAL Id: tel-03092999

<https://hal.science/tel-03092999>

Submitted on 3 Jan 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mobilités quotidiennes et crues éclair : Une rencontre à haut risque !

Isabelle Ruin

24 novembre 2020

Mémoire présenté pour obtenir
l'habilitation à diriger les recherches

Université Grenoble Alpes
Ecole doctorale Terre Univers Environnement

Membres du jury :

- Valérie NOVEMBER, Directrice de Recherche CNRS, LATTIS, rapporteure
- Léna SANDERS, Directrice de Recherche CNRS, Géographie-Cités, rapporteure
- Remko UIJLENHOET, Professeur, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, rapporteur
- Emmanuel BONNET, Directeur de Recherche IRD, UMI Résiliences, examinateur
- Paule-Annick DAVOINE, Professeure Université Grenoble Alpes, PACTE, examinatrice
- Martial MERMILLOD, Professeur Université Grenoble Alpes, Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition, examinateur

Table des matières

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | Introduction | 7 |
| 2 | Les échelles emboîtées de l'exposition humaine aux crues rapides | 11 |
| 2.1 | Échelles des processus hydro-météorologiques | 13 |
| 2.2 | Échelles d'exposition humaine | 19 |
| 2.3 | Les pratiques de mobilité quotidiennes à la croisée d'échelles sociales, spatiales et temporelles | 23 |
| 2.4 | Processus décisionnels : des comportements routiniers à la mise en protection face au danger | 29 |
| 2.5 | Synthèse | 40 |
| 3 | Retour d'expériences et analyses couplées des processus socio-hydro-météorologiques | 43 |
| 3.1 | Méthodes de retours d'expériences socio-hydro-météorologiques | 45 |
| 3.2 | Les réponses sociales au prisme des dynamiques hydro-météorologiques | 53 |
| 3.3 | Synthèse et perspectives | 66 |
| 4 | La prédiction des événements à forts impacts est-elle possible et utile ? | 73 |
| 4.1 | Extrêmes hydro-météorologiques et exposition des mobilités quotidiennes : Le model MobRISK | 75 |
| 4.2 | Modélisation probabiliste des impacts humains des crues rapides aux USA | 95 |
| 4.3 | ANYCaRE : Un jeu sérieux pour comprendre les enjeux scientifiques, opérationnels et communicationnels de la gestion de crise | 114 |
| 4.4 | Synthèse et perspectives | 126 |
| 5 | Conclusion et perspectives de recherche | 131 |

| | | |
|-----|---|------------|
| 5.1 | Trajectoires de vulnérabilité aux risques hydro-climatiques : exploration des interactions d'échelles | 134 |
| 5.2 | Le projet "Expériences immersives et résilience comportementale" . . | 144 |
| 5.3 | Exploration à venir autour de la notion de services climatiques en Afrique de l'Ouest | 154 |
| | Bibliographie | 157 |
| | Table des figures | 175 |
| | Dossier administratif | 181 |

Préambule

Avant d'entrer dans le vif de mes recherches de ces 10 dernières années, il semble bon de rappeler le parcours plutôt atypique qui précéda mon entrée au CNRS et les raisons qui ont conduit à m'intéresser à la vulnérabilité humaine face aux risques naturels en me focalisant presque exclusivement sur le risque de crues rapides

Ce parcours est d'abord le fait de rencontres avec des scientifiques passionnés et passionnants et des vulgarisateurs de l'environnement. En remontant dans ma jeunesse, les figures de proue de mon attirance pour le risque naturel et de mon goût pour la recherche sont, pour les unes des figures charismatiques de la volcanologie comme Maurice et Katia Kraft ou Aroun Tazieff, et pour les autres des chercheurs géologues et paléontologues moins connus du grand public mais que j'ai eu la chance de côtoyer de près. Ainsi, depuis mon enfance, je suis fascinée par les images de volcans en éruption et les histoires des Hommes et des sociétés qui bravaient cette menace soit pour la science, soit au quotidien pour vivre dans un état d'équilibre fragile entre risques et aménités. Cette fascination a d'abord conduit à m'initier à la géologie au départ par le biais de chantiers de fouilles paléontologiques ouverts aux jeunes où j'ai eu la chance de mettre à jour de véritables trésors fossiles vieux de plusieurs millions d'années. Cette expérience incroyable a été d'autant plus marquante et formatrice qu'elle était accompagnée par des chercheurs enthousiastes et pédagogues (Francis Duranthon, Leonard Ginsburg pour ne pas les nommer) qui ont su transmettre leurs connaissances et planter les graines d'une curiosité et d'une méthode scientifique. Ces rencontres ont naturellement orienté mon parcours vers des études en géologie avec une spécialisation en matière d'aléas naturels. Une première expérience de 4 ans de travail comme "emploi-jeune" dans le domaine de l'éducation à l'environnement m'a ensuite fait découvrir le volet social du risque, la façon dont l'homme modèle le territoire pour en tirer profit mais en créant également les conditions de sa propre vulnérabilité. C'est ce qui m'a attiré

vers la géographie et la reprise d'un Master dans ce domaine.

De nouvelles rencontres, celles de Céline Lutoff, Jean-Dominique Creutin, Sandrine Anquetin et Eve Gruntfest en particulier ont finalement orienté mes interrogations vers ces objets complexes que représentent les événements de crues rapides. Je me rappelle parfaitement bien de ces quatre rencontres fondatrices. D'abord Céline Lutoff, que j'ai découvert en suivant ces cours de DEA sur l'exposition et la vulnérabilité à l'Institut de Géographie Alpine. Sa personnalité, la clarté et la logique de son discours sur l'approche systémique par les enjeux m'ont semblé tellement lumineux que j'ai su dès lors que je voulais travailler sur ce sujet à ses côtés. Dans ma recherche de financement mais également de collaborations avec les géosciences j'ai ensuite rapidement rencontré Jean-Dominique Creutin et Sandrine Anquetin. Les nombreux échanges animés que j'ai eu avec Jean-Dominique ont toujours été éminemment inspirants de par la profondeur de son raisonnement et la clairvoyance des questions interdisciplinaires qu'il se pose sur les phénomènes météo-climatiques. D'une grande humanité et toujours à l'écoute Sandrine a su m'apporter un soutien sans faille et en particulier pousser mon approche au sein de la communauté scientifique intéressée aux risques hydro-climatiques en Méditerranée. Finalement, lorsque j'étais plus avancée dans ma thèse, j'ai eu la chance de rencontrer Eve Gruntfest à plusieurs reprises, et en premier lieu dans le cadre de ma participation en 2005-06 au premier workshop "*Was*Is : Weather and society Integrated studies*" au National Center for Atmospheric Research (NCAR). Là encore cette rencontre a contribué à changer le cours de ma vie professionnelle. Outre sa profonde générosité, ce qui frappe à première vue c'est son engagement et son enthousiasme à créer des interactions entre les gens et experts de différents domaines. Cette énergie communicative, ses encouragements et son soutien à poursuivre dans la voie de l'interdisciplinarité sur le thème des crues rapides, qu'elle a elle-même grandement contribué à faire avancer, m'ont donné la confiance nécessaire pour oser postuler aux prestigieux financements post-doctoraux de l'*Advanced Study Program*, d'NCAR. Sans l'aide de ces quatre personnes, il est clair que je ne serais pas chercheuse au CNRS et encore moins en train de rédiger cette HDR aujourd'hui. Il va s'en dire que ma reconnaissance va également à la commission de recrutement de la section 45 (maintenant 52) du CNRS qui a cru en mon potentiel et compris que la ligne droite n'est pas l'unique critère de motivation et de réussite.

Cette interdisciplinarité tant souhaitée et promue pendant toute sa carrière par Eve Gruntfest, qui lui a dernièrement consacré l'ouvrage "*Weather and Society, toward integrated approaches*", fait couler beaucoup d'encre depuis quelques années. Pour ma part,

je la vis au quotidien surtout depuis mon recrutement en 2009 par une section interdisciplinaire du CNRS au sein du Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), maintenant connu sous le nom de d'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE). L'interdisciplinarité, au contraire de ce que beaucoup souhaiterait, ne se décrète pas, elle se pratique au jour le jour et sur le long terme. Pour se la représenter, j'aime beaucoup l'image de l'éponge ou du sachet de thé qui infuse lentement. Elle nécessite une immersion dans un milieu pour mieux en saisir les codes et les subtilités et surtout pour apprendre à développer un vocabulaire commun qui pourra conduire à construire des problématiques de recherche intégrées. En utilisant les mêmes mots, on a au premier abord l'impression de parler la même langue ce qui est dans les faits rarement le cas. Il faut du temps pour apprendre à se comprendre et à entrevoir comment la science des uns peut apporter à celle des autres et vis versa. L'idée n'est pas de coller des résultats de recherche disciplinaires les uns aux autres pour en faire un patchwork mais bien de tisser les bruns faits de différentes approches disciplinaires pour en faire une tapisserie plus forte de sens. Eve Gruntfest avait lors de son séjour de recherche au National Weather Center à Norman (Oklahoma) eu le génie d'inventer l'acronyme "*SSWIM : Social Science woven into Meteorology*" qui me paraît parfaitement représenter cette idée de tissage pouvant finalement conduire au métissage de nos recherches.

Pratiquer l'interdisciplinarité dans la recherche peut avoir des côtés frustrants : c'est de la science lente qui n'est pas forcément très bien reconnue par les sciences "pures". La géographie et la géographie du risque en particulier se prête bien aux approches interdisciplinaires, même si le géographe peut avoir la tentation de traiter l'ensemble des composantes du risque qu'elles soient physiques ou sociales sans faire appel à des experts de chaque domaine. Même quand l'objet "Risque" rassemble de nombreuses disciplines qui trouvent à publier dans des journaux reconnus de chacune d'entre elles, ce n'est pas toujours l'intégration des connaissances qui est recherchée. Ma chance, en rejoignant un laboratoire de l'INSU¹ spécialisé dans l'étude du climat, du cycle de l'eau, de la cryosphère et des environnements naturels et anthropisés, a été de bénéficier d'un environnement extrêmement favorable pour développer des recherches interdisciplinaires. L'équipe HMCI (Hydro-Météorologie, Climats, Impacts) qui m'a accueilli et a délibérément pris un S (HMCIS) pour représenter la thématique d'Interaction avec la Société que j'apportais est me semble-t-il pionnière dans le métissage SHS-Géosciences en France. Ainsi j'y ai trouvé des collègues experts de différents domaines particulièrement ouverts d'esprit et curieux qui ont pris le temps d'échanger et/ou de lire des

¹Institut des Sciences de l'Univers du CNRS

articles en dehors de leur domaine de compétence. Ces échanges d'abord informels se sont rapidement concrétisés autour de la création dès 2010 d'un séminaire interdisciplinaire mensuel intitulé AMETHST² réunissant des chercheurs en sciences humaines et en géosciences issus initialement des laboratoires Grenoblois PACTE et IGE. De la géographie sociale, des sciences de l'atmosphère, de l'hydrologie et du climat, le cercle des compétences s'est progressivement étendu à l'économie environnementale, la sociologie, la sismologie, les sciences de la communication et les statistiques. Cette espace d'échange est pour moi et pour les autres participants l'occasion de découvrir et d'approfondir des sujets et lectures scientifiques choisis conjointement et plus éloignés de nos principaux centres d'intérêt.

Lors de mes premiers pas en recherche, je n'avais pas imaginé que j'aurais autant d'occasions d'apprendre de ces événements "extrêmes" de crues rapides. Ainsi, même si ceux-ci sont considérés comme exceptionnels, j'ai eu en l'espace de 12 ans l'opportunité d'étudier 7 occurrences de ce phénomène en me focalisant uniquement sur 4 départements côtiers du Sud-Est de la France.

D'abord, l'actualité des crues majeures des 8-9 septembre 2002 a guidé mes travaux de DEA et de thèse vers le département du Gard et une problématique décelée sur le terrain post-crise. Les entretiens avec les victimes de cet épisode m'ont amené à mettre en lumière les contraintes et capacités d'adaptation individuelles face à ce type d'événement insidieusement perturbateur des routines quotidiennes, que je classifierais dans la catégorie des "risques scélérats"³ selon la définition de Dedieu [2009]. Le terme de "risque scélérat" me semble assez approprié au cas des crues rapides dont le premier marqueur est celui d'une très forte et courte pluie d'orage, ce qui arrive couramment et semble assez bénin et ordinaire. Malheureusement dans certaines conditions (concentration des pluies sur un petit bassin versant à réaction rapide), cela peut vite se transformer en ruissellements violents, destructeurs et particulièrement meurtriers. Comme je le détaillerai dans ce mémoire, la résonance entre les échelles spatio-temporelles des processus météorologiques et hydrologiques est un verrou scientifique majeur de la prédictibilité à fine échelle de ce type d'événement. Partant de ces difficultés en matière de prévision et d'alerte à la population, mes recherches se sont surtout attachées à montrer le lien entre ces échelles hydro-météorologiques spécifiques et celles qui touchent à l'exposition des populations de par leurs activités et mobilités quotidiennes. Ainsi, les

²acronyme des mots clefs Anticipation, Mobilité, Echelles spatio-Temporelles, Intégration, hydro-météo, Société, Territoires définissant nos intérêts communs

³qui le définit comme un phénomène menaçant dont l'annonce passe inaperçue, parce qu'il prend une apparence normale

crues soudaines ont la capacité de faire irruption dans les espaces de vie et d'activités où l'on s'y attend le moins, car parfois bien éloignés des principaux cours d'eau, et dans lesquels l'Homme est particulièrement vulnérable. C'est ce que j'ai pu constater de façon empirique lors de ma première expérience de terrain en interrogeant les victimes Gardoises des crues de 2002.

Les crues de 2005, toujours dans le Gard, m'ont ouvert aux problématiques de l'alerte et la gestion de crise avec une expérience *in situ* pendant près de 24h au sein de la cellule de crise en préfecture, puis le jour suivant en passant la nuit dans un gymnase sur un lit de camp au milieu des sinistrés d'Alès. Ce jour là, j'ai testé "pour de vrai" et involontairement ma problématique : suivre presque à la lettre un programme d'activités prévu de longue date au mépris des signes environnementaux. On peut dire que j'étais sensibilisée, je m'étais même informée des conditions locales, et pourtant j'ai moi aussi traversé des sections de routes inondées pour atteindre coûte que coûte le lieu de mon rendez-vous. Je crois que c'est à partir de ce moment là que j'ai été intimement convaincue que la majorité des accidents lors de ces événements ne sont pas liés à l'irrationalité des comportements ou à l'imprudence volontaire.

Dès mon retour de post-doc, j'ai eu à nouveau l'occasion de confronter mes hypothèses sur le terrain post-crise suite aux crues de juin 2010 et novembre 2011 dans le secteur de Draguignan, Var. Les plus récentes que j'ai étudié en utilisant une nouvelle technique d'enquête datent de l'automne 2014 dans les secteurs de Nîmes et Montpellier puis d'octobre 2015 suite aux événements dramatiques des Alpes Maritimes. C'est forte d'une approche inductive basée sur cette expérience de terrain que j'ai construit un raisonnement et une compréhension de l'interaction des processus *hydro-météo-socio-spatiaux* à l'oeuvre. C'est surtout grâce aux nombreux habitants sinistrés ou experts qui m'ont accordé de leur temps pour témoigner de leur expérience que j'ai pu rassembler les pièces du puzzle que je vais tenter de reconstruire dans ce document.

Introduction

Les villes et les milieux urbanisés au sens large constituent un milieu fortement anthropisé où les dynamiques naturelles sont bouleversées par les divers aménagements. Dans ces espaces, la nature a perdu sa place dans le paysage comme dans les esprits. Les contraintes de la vie quotidienne et notamment la nécessité de mobilité pour rejoindre son lieu de travail ou de vie prend le pas sur les risques exceptionnels que peuvent représenter les phénomènes naturels. Malheureusement, les conséquences de ces phénomènes sont bien souvent aggravées par le système urbain lui-même. Ainsi, le risque hydrologique, par exemple se trouve fortement exacerbé par l'imperméabilisation des sols qui augmente le ruissellement, par la densité humaine qui constitue un facteur d'exposition majeur, et par la concentration des ressources économiques, des centres politiques et des flux de toutes sortes.

Avec l'objectif d'une maîtrise des risques, les sociétés modernes ont mis en place des systèmes de prévention reposant sur le zonage, l'alerte et la construction d'ouvrage de protection visant à canaliser et gérer les extrêmes pluviométriques. Ainsi le risque d'inondation lente, même s'il est toujours présent, se réduit de plus en plus à des dégâts matériels difficilement évitables. À l'inverse, les crues à dynamique rapide continuent de présenter un enjeu en termes de vies humaines puisqu'elles restent associées, quelque soit le type de société, à un fort taux de mortalité [Jonkman 2005]. Ce constat paraît d'autant plus préoccupant que les changements climatiques et anthropiques (démographie croissante, mode de vie, urbanisation...) vont dans le sens d'un accroissement du problème. Ainsi, l'étude de ce type d'événement, des vulnérabilités et des réactions d'adaptation qu'il suscite permet d'apporter de nouvelles clés de compréhension des interactions hommes-milieux avec pour objectif l'amélioration

des systèmes de mitigation actuels.

La spécificité des crues rapides réside dans les échelles spatiales et temporelles et la gamme d'intensités mobilisées. En effet, les processus hydrologiques se produisent aux mêmes échelles spatiales et temporelles que les précipitations intenses qui les génèrent [Kelsch *et al.* 2001, Anquetin *et al.* 2004]. Ces caractéristiques ont plusieurs conséquences en termes d'impacts. Du point de vue de la prévision, la conséquence de l'évolution rapide des systèmes précipitants sur des bassins rapides au fonctionnement hydrologique complexe font des crues rapides un phénomène qui reste particulièrement compliqué à prévoir, de façon précise, dans l'espace et dans le temps. Dans le cas des bassins versants de petite taille, le temps nécessaire pour alerter et susciter une réponse appropriée de la part du public est généralement beaucoup plus long que le laps de temps séparant le début de la pluie de l'occurrence des crues résultantes [Kelsch *et al.* 2001]. Ainsi celles-ci sont souvent accompagnées d'un effet de surprise renforcé par la soudaineté et l'intensité de l'élévation du niveau des cours d'eau. Ceci a de fortes conséquences en termes de mobilités avec près de la moitié des décès survenant lors de déplacements (majoritairement en voiture mais aussi à pieds). Mes travaux de thèse ont ainsi identifié les pratiques spatiales quotidiennes comme facteur important de vulnérabilité aux crues rapides. Deux causes à cela : des représentations spatio-temporelles éloignées de la réalité du risque, d'une part ; un manque de flexibilité et d'adaptabilité des pratiques individuelles quotidiennes, d'autre part. Ces résultats reposent principalement sur des enquêtes d'intention dont les mises en situation restent virtuelles. En effet, ces mises en situation font appel aux représentations individuelles qui peuvent s'avérer très éloignées des situations réelles vécues en temps de crise.

Dans ces circonstances, une des plus grosses difficultés réside précisément dans l'évaluation de la situation, d'autant que dans le cas de crue rapide celle-ci peut évoluer extrêmement rapidement. Une même décision peut s'avérer bonne à un instant donné puis inadaptée cinq minutes plus tard. La qualité de la décision dépend donc de son adéquation temporelle avec la dynamique du phénomène, mais aussi de sa compatibilité avec le contexte géographique. Par exemple, surveiller l'évolution du cours d'eau peut s'avérer efficace dans le cas d'une rivière importante dont le temps de montée est de plusieurs heures, mais extrêmement dangereux pour des ruisseaux de petites tailles réagissant en moins d'une heure. Ainsi, face à une situation où les signes avant-coureur du danger ne sont pas clairement identifiables, il peut être difficile de faire la part des choses entre une perturbation de la normalité qui demande une adaptation à la marge et des circonstances exceptionnelles qui nécessitent de changer radicalement de mode

comportemental.

La compréhension des processus à l'origine de la transition entre comportement routinier et comportement de mise en protection nécessite d'observer la succession des décisions dans le contexte de l'évolution des situations vécues et perçues par les individus. Ainsi mes travaux se sont attachés à appréhender, aux échelles allant de l'individu aux organisations sociales de méso-échelles (cellule familiale, groupe scolaire, communauté locale...) l'ensemble des comportements et stratégies d'action mises en oeuvre dans l'espace et dans le temps à l'occasion de perturbations environnementales brutales. L'étude des modes d'adaptation des pratiques aux situations de crise doit permettre de comprendre comment différentes entités sociales font face à leurs obligations quotidiennes au regard de la dégradation des circonstances environnementales. Ces explorations empruntant différents angles d'approches ont confirmé l'intérêt de ne pas faire de dichotomie entre pratiques quotidiennes et pratiques de crise mais bien d'étudier la continuité et l'imbrication spatio-temporelle de ces différentes pratiques qui se conditionnent les unes aux autres. Ces événements, touchant des échelles hydrométéorologiques peu explorées (bassins non jaugés), interagissent avec les socio-dynamiques quotidiennes sur lesquelles l'alerte officielle a bien du mal à agir. Ainsi, mes travaux s'inscrivent également dans une démarche de modélisation couplée des processus socio-environnementaux afin de permettre la prédiction des impacts humains en intégrant les dynamiques de vulnérabilité humaine qu'elles soient de l'ordre de l'exposition ou de la réponse comportementale en situation de crues rapides. Dans cet objectif, mes travaux ont permis de :

- Considérer les pratiques de mobilité et les programmes d'activités individuels comme les éléments indispensables à la compréhension de l'exposition aux risques hydrométéorologiques à dynamique rapide ;
- Etudier en quoi les dynamiques spatio-temporelles liées aux phénomènes d'inondations rapides influencent le rythme d'adoption de pratiques de protection ;
- Identifier les facteurs cognitifs, situationnels et les seuils gouvernant la transition entre un mode de fonctionnement quotidien routinier et un mode de fonctionnement adapté à une situation de crise ;
- Modéliser la variabilité inter-individuelle de l'exposition des mobilités quotidiennes et des comportements de protection lors de crues rapides ;

-
- Envisager la prédiction d'événements hydro-climatiques à forts impacts humains par une modélisation croisée des dynamiques socio-hydro-météorologiques.

Dans le cadre du chapitre 2 de ce mémoire, j'examine l'exposition humaine aux crues rapides en termes d'échelles spatiales et temporelles. Le chapitre suivant s'attache à présenter les méthodes de retour d'expérience post-inondation que j'ai développées et les leçons qu'elles m'ont permis de tirer pour l'analyse couplée des processus socio-hydro-météorologiques. Le chapitre 4 est consacré aux questions de modélisation et de prédiction des événements à forts impacts sociaux. Le dernier chapitre revient sur les verrous scientifiques, les pistes et projets de recherche de ces derniers développements soulèvent.

Les échelles emboîtées de l'exposition humaine aux crues rapides

COLLABORATIONS :

A l'IGE : S. Anquetin, B. Boudevillain, L. Creton-Cazanave, J.-D. Creutin, G. Delrieu, J. Jeuring (CDD).

A l'extérieur : C. Lutoff (PACTE), M. Borga (Univ. Padova, IT), E. Gruntfest (Univ. of Colorado, Colorado Springs, USA), A. Scolobig (Istituto di Sociologia Internazionale di Gorizia, IT).

PROGRAMMES DE RECHERCHE : EU FP6 FLOODsite, Advanced Study Program d'NCAR, ANR Retour Post-Doc ADAPTflood, ANR MobiClimEx

PUBLICATIONS : Ruin *et al.* [2008, 2009], Creutin *et al.* [2009], Ruin *et al.* [2012], Creutin *et al.* [2013], Lutoff *et al.* [2016]

Ce chapitre s'intéresse aux problèmes d'échelles que posent les événements de crues rapides. Cette appréhension par les échelles est née de collaborations avec mes collègues hydro-météorologues. En effet, pour eux les dynamiques des processus atmosphériques et hydrologiques ont des caractéristiques identifiables en termes d'espace et de temps. Ces caractéristiques conditionnent notamment les moyens d'observation de ces phénomènes et dictent les choix de modélisation permettant de les simuler et donc de les prévoir. Mes recherches explorent l'hypothèse que ces échelles physiques, comprises entre 2 et 2000km² pour une gamme de temps allant de la minute à quelques heures, peuvent entrer en résonance et impacter les pans de nos activités humaines caractérisés par les mêmes gammes d'échelles spatio-temporelles.

Une première analyse des conséquences des crues des 8-9 septembre 2002 dans le Gard a permis d'explorer les impacts humains des crues rapides au regard des échelles

des bassins versants à l'origine d'accidents mortels [Ruin *et al.* 2008]. Encouragés par la découverte d'un lien entre échelles physiques et caractéristiques socio-démographiques des victimes, je me suis attachée à élaborer une stratégie d'observation et de modélisation des réponses humaines aux aléas hydro-météorologiques afin de situer les actions humaines dans l'espace et dans le temps, permettant ainsi de les "raccrocher" à un contexte environnemental précis.

La reconstitution de ce contexte m'apparaît essentielle pour envisager les circonstances physiques, perceptives et informationnelles immédiates dans lesquelles ont été prises les décisions en réponse à une situation potentiellement dangereuse. Néanmoins ces facteurs situationnels ne doivent pas faire oublier que les décisions individuelles sont également le fruit de processus cognitifs de plus long terme impliquant une représentation des facteurs aussi bien physiques que sociaux pesant sur l'action finalement mise en oeuvre. Cette approche scalaire a reposé sur les apports théoriques issus du courant de pensée de la *Resilience Alliance* initié dans les années 70 par Holling [1973, 2001]. Pour permettre de mieux cerner la complexité des systèmes sociaux et envisager les interactions d'échelles qui pouvaient être à l'origine des problématiques homme-environnement, d'autres types d'échelles comme celles proposées par Cash *et al.* [2006] et Grossetti [2011] ont également été mobilisées.

Enfin, ce chapitre fait également appel aux apports de la Time-Géographie, de la géographie des mobilités et de la psychologie sociale et cognitive afin d'examiner les liens d'échelle entre les réactions plus ou moins réfléchies face au danger et les pratiques routinières du quotidien.

Cette lecture des processus physiques et humains par les échelles est celle que je propose de résumer dans ce chapitre. Ainsi je m'intéresse d'abord aux processus hydro-météorologiques en identifiant les différentes échelles qu'il nous a semblé utile de mobiliser au regard des impacts humains des crues rapides. La deuxième partie s'intéresse aux échelles de l'exposition humaine aux inondations. Les sections suivantes mobilisent plus avant certaines théories des sciences sociales qui me semblent particulièrement pertinentes pour mieux comprendre la transition entre comportements routiniers ancrés dans le quotidien et réponses aux circonstances dangereuses induites par l'irruption perturbatrice des phénomènes de pluies-inondations.

2.1 Échelles des processus hydro-météorologiques

Les travaux fondateurs d'Orlanski [1975] en météorologie, ont montré que les processus atmosphériques suivent une loi de puissance reliant une gamme d'extensions spatiales à une gamme de durées caractéristiques. Ce lien d'échelle permet de différencier plus précisément ces phénomènes les uns par rapport aux autres. Trois gammes d'échelles sont particulièrement pertinentes pour caractériser les précipitations. Ainsi les phénomènes de convection profonde peuvent être catégorisés dans les processus de plus petites échelles relevant d'une gamme d'extension spatiale située entre 2 et 20 km pour une gamme de durées situées entre la minute et l'heure. L'échelle intermédiaire comprise entre 20 et 200 km est associée à des durées de l'ordre de l'heure à plusieurs heures, comme dans le cas des orages localisés et des systèmes convectifs de méso-échelle (SCME) souvent responsables des épisodes cévenoles les plus étendus. L'échelle la plus grande au delà de 200 km concerne des objets météorologiques tels que les fronts et les ouragans qui durent généralement plusieurs jours.

Les hydrologues ont également montré que les processus hydrologiques répondant aux précipitations opèrent à des échelles d'espace et de temps similaires aux processus à l'origine de ces précipitations mais avec un délai de réponse plus ou moins important selon la taille du bassin versant [Pearce *et al.* 1986, Blöschl et Sivapalan 1995, **Creutin *et al.* 2013**]. En effet, la réponse des bassins versants aux différents objets précipitants n'est pas linéaire. Dans le cas des épisodes orageux à l'origine des crues soudaines, l'intensité des pluies est souvent très hétérogène au cours d'un même épisode. Ainsi, il n'est pas rare, comme le montre l'exemple du bassin de Saint Martin d'Ardèche, d'observer une réponse du bassin en deux temps correspondant à des dynamiques hydrologiques bien différentes (Figure 2.1). La réponse lente, qui s'étale sur plusieurs jours, est due aux transferts souterrains dont les vitesses sont bien moindres que celles de surface. Elle apparaît en réaction aux précipitations qui durent sur l'ensemble de l'épisode, et comprend des processus d'évaporation entre sol, végétation et atmosphère [Creutin 2001]. Au contraire, la réponse rapide suit de plus près les pics de pluie présentant des intensités très fortes mais de courtes durées. Le temps de réponse du bassin (durée séparant le pic de pluie du pic de crue) est liée au temps de transfert, s'opérant à des vitesses de l'ordre du mètre par seconde, des eaux de ruissellement dans le réseau hydrographique. Ce temps de réponse est du même ordre de grandeur que le temps de montée au pic de l'hydrogramme unitaire résultant du pic de pluie.

Une autre conséquence de cette résonance entre échelles météorologiques et hydro-

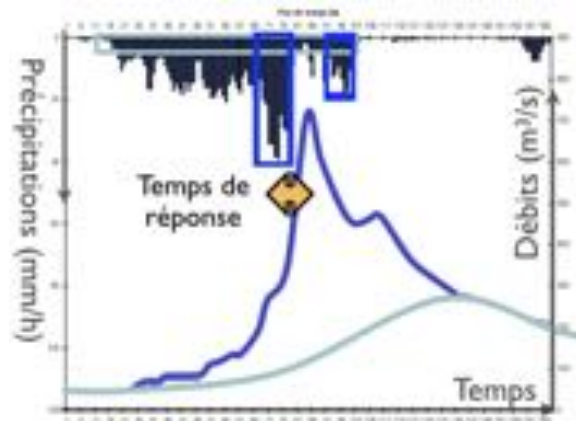


FIGURE 2.1 — Evolution temporelle des pluies moyennes horaires et des débits lors de l'épisode pluvieux d'octobre 1993 ayant affecté l'Ardèche à Sauze Saint Martin (2450 km²) (Thèse I. Zin, 2002). Le rectangle et la courbe bleu clair désignent respectivement les pluies moyennes et la réponse lente de la rivière. Les rectangles et courbes bleu foncé indiquent les pics de pluies conditionnant la réponse rapide du débit. [Creutin 2001].

logiques est l'asynchronie de la réponse des bassins au cours d'un même événement pluvieux. En effet, la réaction des bassins versants va également dépendre de la distribution spatio-temporelle des pluies. Les bassins de petites tailles (quelques dizaines de km²) vont être sensibles à l'occurrence de cellules convectives isolées, intenses et de courte durée dont les maxima de pluie sont centrés sur ces bassins. Ainsi des ruissellements violents et dévastateurs peuvent apparaître soudainement à l'occasion d'un orage isolé dans des zones à la topographie peu contrastée mais néanmoins capable de concentrer les eaux. Les cours d'eau drainant des surfaces de quelques centaines de km² sont moins sensibles à ce type de pluies très localisées [Creutin *et al.* 2013]. Leurs réactions sont conditionnées par l'occurrence de phénomènes météorologiques de plus grande échelle tels que des systèmes convectifs de méso-échelle. Lors d'un même événement, sous l'effet de l'emboîtement des tailles de bassins versants et de la distribution spatio-temporelle des pluies, un territoire situé à la confluence d'un petit et d'un grand bassin versant peut se retrouver inondé par deux pics de crues décalés dans le temps. Cet étagement des temps de réponses au sein d'un même bassin versant composé de sous-bassins versants de tailles plus réduites est illustré par la figure 2.2).

J'ai pu constater cet asynchronisme des débordements à Remoulins lors des crues des 8-9 septembre 2002 dans le Gard [Ruin 2007a, Ruin *et al.* 2009, Creutin *et al.* 2013]. Lors de cette crue historique, l'Est de la ville a d'abord été inondé par un affluent du Gardon, la Valliguière drainant un bassin de 93 km² et répondant à un premier orage localisé. Douze heures plus tard, le Gardon dont le bassin s'étend sur 1839 km² au niveau de Remoulins, est venu à son tour inonder la ville, dans sa partie

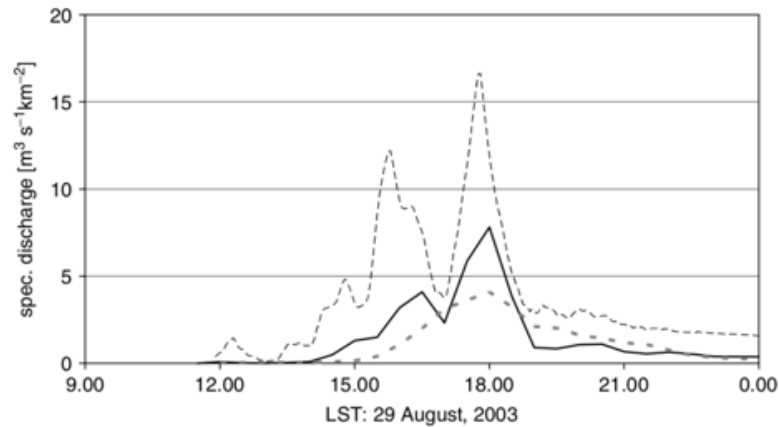


FIGURE 2.2 — Exemple de débits spécifiques mesurés dans le bassin versant de la rivière Fella (Italie) lors de l'épisode pluvieux du 29 août 2003 pour 3 sous-bassins de tailles différentes : (---) Bassin de Cucco (0.65 km^2); (—) Rivière d'Uqua à Ugovizza (24 km^2); (- - -) Rivière Fella à Pontebba (165 km^2) [Creutin *et al.* 2009].

Ouest cette fois, en réaction à un ensemble de cellules orageuses plus larges, de niveau régional. Comme j'ai pu le constater à travers les témoignages post-crue cette double montée des eaux a surpris les habitants et les autorités qui étaient loin d'imaginer une telle situation.

Sur la base de données d'observation pluie-débit d'événements majeurs de crues rapides en Europe, **Creutin *et al.* [2013]** ont montré qu'il existait une relation mathématique entre ces deux variables. Cette relation suit une loi de puissance qui indique qu'il y a un rapport constant (la pente de la droite en log) entre l'ordre de grandeur de la surface du bassin et l'ordre de grandeur du temps de réponse, le temps de réponse diminuant avec la surface du bassin versant (Figure 2.3). Cet article confirme l'existence d'un point d'inflexion de cette relation linéaire à partir des bassins de l'ordre de 350 km^2 , ce qui indique que les bassins inférieurs à cette taille ont un temps de réponse qui diminue d'autant plus avec la surface du bassin. Cette relation entre surface et temps de réponse permet de caractériser la vitesse de survenue d'une crue sans avoir recours à des mesures de débit *in situ*, ce qui, dans le cas de petits bassins pour la plupart non-jaugés, est très pratique.

Sur la base de ces considérations d'échelles, nos réflexions interdisciplinaires nous ont conduit à examiner de plus près les échelles caractéristiques des crues rapides, beaucoup plus meurtrières que les crues lentes [Jonkman 2005], pour voir en quoi celles-ci pouvaient conditionner une forme d'exposition et de vulnérabilité humaine particulière. Notre raisonnement se base sur le lien entre temps de réponse des cours

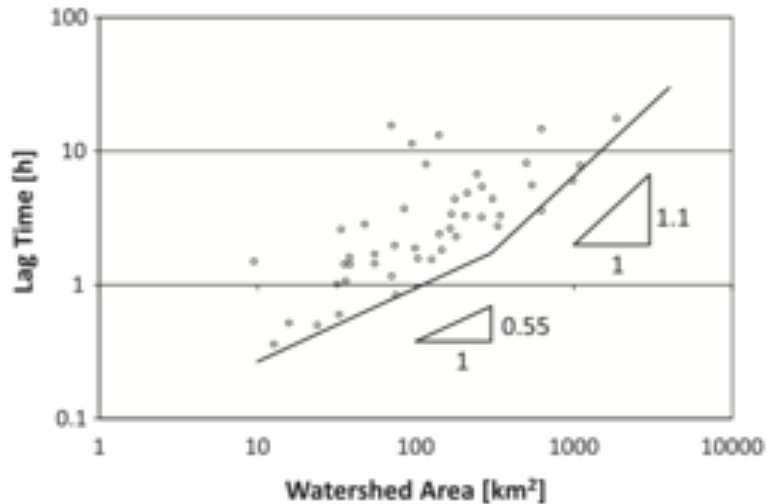


FIGURE 2.3 — Relation entre la surface du bassin versant et son temps de réponse. La droite marque la limite inférieure de la relation et indique clairement le point d'inflexion de cette relation à partir d'une surface de bassin d'environ 350 km², [Creutin *et al.* 2013].

d'eau aux sollicitations pluvieuses et surface des bassins versants, faisant l'hypothèse que plus ce temps de réponse hydrologique est court, plus la capacité d'anticipation et de réaction des populations est faible.

Il est évident que la sensibilité des très petits bassins aux orages constitue un challenge en termes de prévision et d'alerte. Cela nécessite de prévoir avec précision la localisation spatio-temporelle des précipitations ce qui n'est possible que pour un temps d'anticipation très court. De plus, la vitesse de réaction des bassins à partir de l'occurrence des pluies (de l'ordre de la dizaine de minutes) demandent aux territoires et personnes exposées de s'organiser et se mettre en protection au moins au même rythme que celui de la montée des eaux. Sachant tous les freins cognitifs et sociaux contraignant la réponse sociale, déjà largement documentés dans la littérature [Mileti 1995, Lindell et Perry 2003], il ne semble pas surprenant que les crues rapides restent des événements particulièrement meurtriers malgré les progrès technologiques (et notamment l'arrivée du radar météorologique) et communicationnels de ces dernières décennies.

Questionnés par cette surmortalité des personnes lors de crue rapide, nous avons choisi d'interroger les circonstances socio-démographiques et hydrologiques ayant concouru à l'occurrence d'accidents fatals lors des crues de septembre 2002 dans le Gard en nous servant de la relation [surface des bassins versants-temps de réponse] pour reconstituer les dynamiques hydrologiques [Ruin *et al.* 2008]. Dans le cadre de cette étude, une première difficulté a consisté à récupérer des informations précises sur la locali-

sation, l'heure et les circonstances des accidents ainsi que les caractéristiques personnelles (principalement le genre et l'âge) des victimes. Ce travail fut laborieux car ce type de donnée n'est pas collectée de façon centralisée¹ et il faut avoir recours à différentes sources qu'elles soient médiatiques ou officielles, qu'il faut ensuite recouper et confirmer par quelques visites de terrain et témoignages de première main. Ensuite, nous avons cherché à associer ces accidents avec une taille de bassin versant et donc une dynamique de crue. Il ressort de cette première analyse exploratoire basée sur 17 accidents que la répartition des caractéristiques des 20 victimes et des circonstances accidentelles ne sont pas uniformément réparties à travers les échelles mais qu'elles se distribuent en deux groupes bien distincts qui reflètent chacun une forme d'exposition et de vulnérabilité particulière (Figure 2.4).

La première forme de vulnérabilité est associée à de grands bassins versants (supérieur à 1000 km²) dont les temps de réponse dépassent 9h (selon la formule proposée par **Creutin et al. [2013]**). Les victimes associées ont des profils correspondant aux critères de vulnérabilité bien identifiés dans la littérature traitant de vulnérabilité sociale [Cannon 1994, Cutter et al. 2003, Wisner et al. 2004]. Elles sont relativement âgées

¹A l'heure actuelle, il existe une base de données rassemblant les informations sur les victimes et les circonstances des accidents mortels lors de crues rapides dans le Sud de la France depuis 2000, mais la maintenance de celle-ci et la poursuite de la collecte n'est pas encore organisée à l'échelle institutionnelle

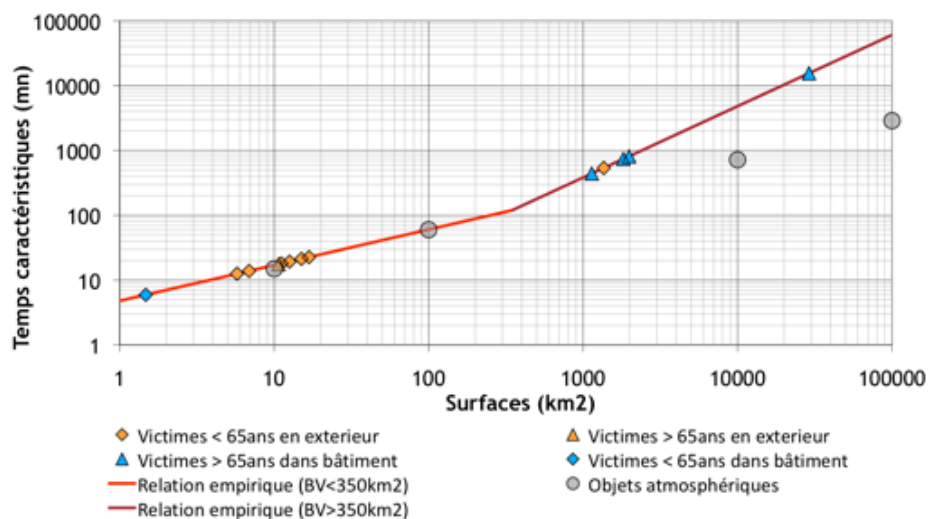


FIGURE 2.4 — Échelles spatio-temporelles des bassins versants meurtriers pendant les crues de septembre 2002 dans le Gard. Les courbes rouges représentent les relations empiriques pour les bassins inférieurs et supérieur à 350 km² selon **Creutin et al. [2013]**. Les triangles et losanges représentent le croisement entre la taille des bassins versants responsables d'accidents fatals, la catégorie d'âge des victimes et le lieu de l'accident. Les objets atmosphériques en cause, tels que définis par Orlanski [1975], sont figurés par des cercles gris. Source : [**Ruin et al. 2008, Ruin 2015**].

(âge médian : 72, âge moyen : 71) et dans la quasi-totalité des cas ces victimes ont péri chez elles en fin de soirée ou dans la nuit. De nombreux auteurs ont depuis longtemps mis en évidence une vulnérabilité spécifique liée à l'âge qui confère non seulement une certaine fragilité physique et donc une difficulté à fuir mais également une forme de marginalisation sociale entraînant un manque d'information et notamment d'accès à l'alerte [Clark *et al.* 1998, Cutter *et al.* 2003, Chakraborty *et al.* 2005, Azar et Rain 2007].

La deuxième forme de vulnérabilité concerne des victimes, principalement en situation de mobilité, dans des très petits bassins (inférieur à 20 km²) dont le temps de réponse, selon la formule *ad hoc*, est inférieur à 30 minutes. Ce profil de vulnérabilité n'était jusqu'alors pas identifié dans la littérature consacrée. Il compte principalement des personnes d'âge moyen (médiane : 46, moyenne : 43) et en plus grande proportion de genre masculin.

Si à l'époque de cette réflexion certaines études avaient déjà mis en avant l'usage d'un véhicule motorisé comme une cause majeure de mortalité lors d'inondation [Staes *et al.* 1994, Coates 1999, Jonkman et Kelman 2005, Drobot *et al.* 2007, Ashley et Ashley 2008, Maples et Tiefenbacher 2008], aucune d'entre elles n'avait réellement fait le lien entre les circonstances des accidents, le profil des victimes et les dynamiques hydrologiques. A la lumière de nos résultats, il semble donc que les bassins à dynamique rapide posent principalement problème aux personnes dans la force de l'âge, spécifiquement en situation de mobilité à l'extérieur, alors que les bassins lents affectent en particulier les personnes âgées et de plus faible mobilité à l'intérieur de bâtiment. Ce premier résultat assez qualitatif, car basé sur peu de données, sera confirmé par la suite par plusieurs études aux USA, en Australie et en Europe [Sharif *et al.* 2012, Diakakis et Deligiannakis 2013, Doocy *et al.* 2013, Spitalar *et al.* 2014, Haynes *et al.* 2017, **Terti *et al.* 2017***].

Faut-il interpréter ce résultat préliminaire comme une forme de résonance entre échelles des processus physiques et échelles d'exposition humaine ? C'est en tout cas une des questions qui a fortement influencé la suite de mes recherches. Ainsi, en quête de cette forme de résonance, je me suis ensuite attachée à mieux cerner les échelles d'exposition des populations que ce soit du fait de décisions individuelles, d'interactions plus collectives ou de choix sociétaux. La section suivante propose de mobiliser de façon complémentaire d'autres types d'échelles plus adaptées à l'appréciation des actions humaines.

2.2 Échelles d'exposition humaine

Cette approche scalaire des phénomènes naturels et sociaux a conduit à m'intéresser aux travaux développés par Holling et ses collègues [Holling 2001, Gunderson et Holling 2001] autour des questions de complexité et de résilience des socio-écosystèmes. Le concept de "hiérarchie" (initialement proposé par Simon [1974]) définit des niveaux semi-autonomes, formés des interactions entre des variables partageant des vitesses et des attributs spatiaux similaires. Chaque niveau communique en partie avec les niveaux inférieur et supérieur fonctionnant à des vitesses et sur des échelles d'espace différentes. Selon Simon [1974] chaque niveau d'une hiérarchie, de quelque nature qu'elle soit, sert deux fonctions : i) celle de maintenir et stabiliser les conditions environnant les niveau inférieurs (de plus petite taille et vitesse plus grande), ii) de favoriser l'innovation au sein de chaque niveau. Holling [2001] propose une représentation d'exemples de hiérarchies écologiques positionnées sur un diagramme spatio-temporel au même titre que les processus atmosphériques auxquelles elles sont sensibles (figure 2.5a). Cette approche scalaire des socio-écosystèmes complexes m'a encouragée à examiner les processus sociaux impliqués dans les événements de crues rapides en m'intéressant aux interactions entre variables situées sur un même niveau de l'échelle spatio-temporelle mais également en envisageant la façon dont les processus de petites échelles interagissent avec ceux de plus grandes échelles.

Une des premières difficultés de cet exercice a été de qualifier les processus sociaux en terme d'espace au sens métrique du terme. Ainsi s'il est facile d'analyser les pratiques de mobilités en terme de kilomètres parcourus en un temps de donné, il y a beaucoup moins de sens à parler de l'application d'une politique publique en terme de kilomètre carré. En fonction de la densité de population ou de la nature du découpage administratif, une même surface en kilomètre carré peut concerner une quantité de personnes ou un type de territoire totalement différent. Ainsi selon Westley *et al.* [2001] si l'espace et le temps sont des dimensions importantes de l'organisation sociale, la dimension symbolique est celle qui caractérise spécifiquement les systèmes sociaux. La capacité des humains à produire du sens via la communication, le langage et les symboles leur permet d'inventer un ordre qui fait sens pour eux et d'agir en accord avec ce monde inventé. C'est par exemple le cas des lois qui sont un construit et peuvent évoluer dans le temps par l'action d'une société, au contraire des lois de la physique sur lesquelles l'homme a peu de prise. D'après Westley *et al.* [2001] "*sense making and signification not only provide a powerful shaping force, they also provide a third hierarchy, equal to space and time, for structuring social system dynamics*" [Westley et al. 2001, p. 108].

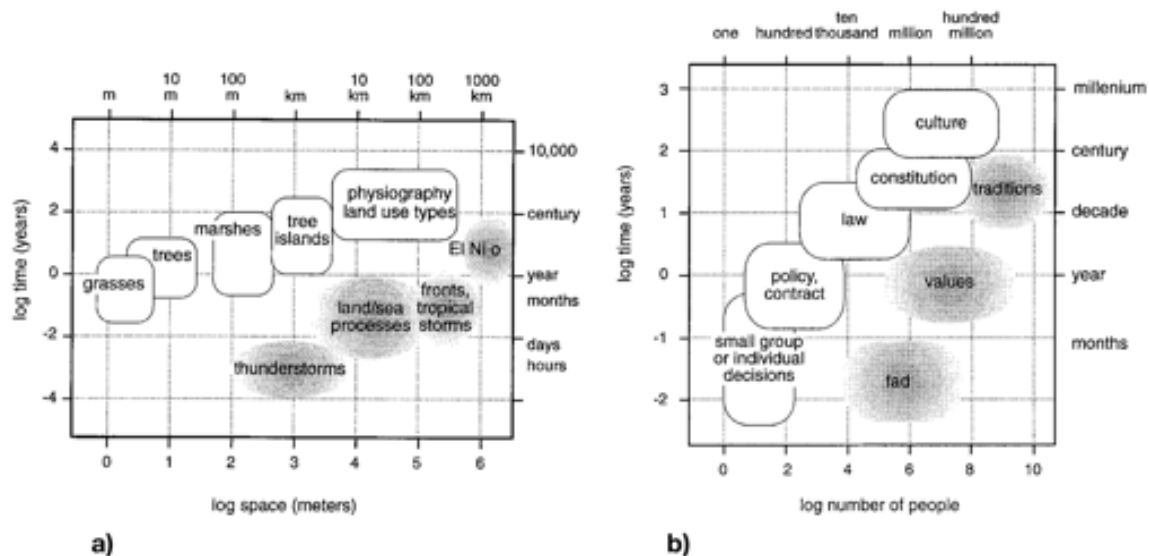


FIGURE 2.5 — a) Echelles d’espace et de temps caractéristiques d’un exemple de hiérarchies constituant l’écosystème des Everglades [Holling 2001] ; b) Echelles de masse et de temps caractéristiques de la hiérarchie institutionnelle composée d’un ensemble de règles propres aux sociétés humaines. A la différence des hiérarchies écologiques, celles-ci sont construites sur la base du nombre de personnes impliquées dans la constitution de ces structures et du temps de renouvellement de celles-ci [Westley *et al.* 2001, Gunderson et Holling 1995].

Gunderson et Holling [1995] représentent la hiérarchie des structures de signification en les replaçant sur l’échelle de temps à laquelle ils font correspondre une échelle quantitative figurant le nombre de personnes impliquées (Figure 2.5b). Comme pour les processus physiques, cette représentation suggère qu’il y a un lien entre le nombre de personnes impliquées dans le processus et la durée de celui-ci. Ainsi même si la capacité des hommes à communiquer entre eux à distance sur un temps très court est facilitée par les nouvelles technologies, le temps de la négociation pour arriver à un accord, sur les termes de la loi par exemple, et de sa mise en oeuvre serait d’autant plus long qu’il implique un grand nombre de parties.

Cash *et al.* [2006] proposent également d’autres types d’échelles pour mieux saisir et identifier les problèmes d’interactions homme-environnement pouvant mettre en péril la résilience de ces systèmes. Les auteurs distinguent ainsi l’échelle juridictionnelle, proche de l’échelle spatiale, mais permettant de définir clairement les limites des différents niveaux territoriaux et administratifs comme par exemple pour la France les arrondissements, communes, cantons, départements, régions. Elle se différencie de l’échelle institutionnelle, relative à la hiérarchie des lois et règles collectives (i.e. règles, lois, directives, constitution). L’échelle de management est proposée pour différencier une hiérarchie de niveaux permettant la planification d’actions allant de la

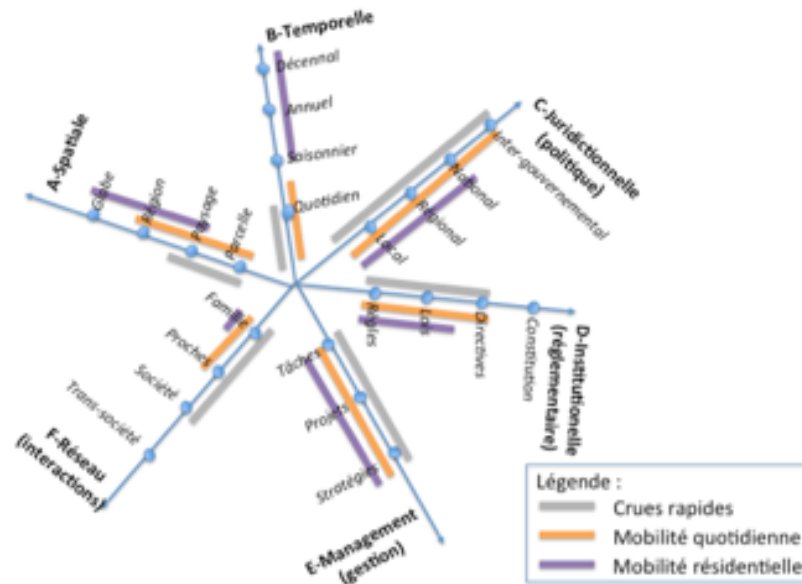


FIGURE 2.6 — Echelles et niveaux critiques pour l'analyse des interactions entre crues rapides et processus de mobilités quotidiennes et résidentielles [Lutoff *et al.* 2016, 2018].

tâche à la stratégie en passant par le projet. L'échelle de réseau (network scale) se réfère à certaines interactions qui ne relèvent pas directement de considérations spatiales ou juridictionnelles (politique), comme les marchés, les réseaux communautaires (religieux par exemple), les réseaux professionnels ou associatifs. Enfin, Cash *et al.* [2006] proposent une échelle de connaissances (knowledge scale) qui permet de différencier des systèmes de connaissances qui sont rarement connectés tels que la connaissance scientifique d'un côté et les savoirs fondés sur l'expérience, dits parfois "profanes", de l'autre.

Sur cette base, les réflexions conduites dans le cadre du projet ANR MobiCLIMEX (2013-17), nous ont permis d'identifier différentes échelles et niveaux d'analyse pertinents pour comprendre les interactions entre crues rapides et mobilités résidentielles et quotidiennes [Lutoff *et al.* 2016, 2018]. La figure 2.6, montre en particulier que du point de vue des échelles de temps et d'espace, les crues rapides et les mobilités quotidiennes mobilisent toutes deux des niveaux de petite échelle. Les mobilités professionnelles se cantonnent généralement à l'échelle locale (par exemple dans le Gard, l'analyse des données de navettes domicile-travail de l'INSEE indiquent, qu'en 2006, 91% des actifs travaillaient dans leur département d'habitation) du fait des contraintes temporelles imposées par les rythmes de travail et les durées de déplacements. Une faible proportion de personnes effectuent cependant des trajets plus longs qui nécessitent une adaptation de la fréquence de déplacement, qui sort ainsi du cadre quotidien, et du mode de transport impliquant une vitesse de déplacement très élevée (TGV, avion).

Les mobilités résidentielles concernent tous les niveaux de l'échelle spatiale pour des durées de résidence qui sont généralement au minimum de l'ordre du saisonnier et pouvant aller jusqu'au décennal.

Les échelles juridictionnelles (relatives aux décisions politiques) et institutionnelles (marquant la hiérarchie des normes) impliquées dans les trois phénomènes observés sont assez proches. Certaines décisions politiques et normes réglementaires concernant la gestion des crues rapides et la mobilité quotidienne sont issues de directives européennes, transposables au droit français, dans le respect de la constitution. Il s'agit en particulier de la directive européenne Inondation promulguée en 2007 et transposée dans le droit français à travers la loi du 12 juillet 2010 (dite Grenelle 2), comportant six chantiers dont un sur la prévention des risques. Ces dispositifs réglementaires ont permis de définir la Stratégie Nationale de Gestion des Risques d'Inondation (SNGRI), promulguée en octobre 2014, et d'identifier des Territoires à Risques d'Inondation (TRI) au sein desquels doivent être définis des Plans de Gestion des Risques Inondation (PGRI) à l'échelle des districts hydrographiques (ou grands bassins, au nombre de 8 en France métropolitaine). La mobilité quotidienne et les déplacements relèvent également de directives européennes visant, depuis les années 1970 la réduction des gaz à effets de serre [Hugrel et Joumard 2006]. Leur mise en application en France passe également par les lois Grenelles I et II de 2009 et 2010 qui ont conduit à l'établissement de Plans de Déplacements Urbains dans les agglomérations françaises et la définition de Zones d'Actions Prioritaires pour l'Air (ZAPA) sur certains territoires expérimentaux. La mobilité résidentielle repose principalement sur des décisions prises à l'échelon national ou local, pour contribuer notamment au développement d'habitations à loyers accessibles pour tous. C'est le cas par exemple de la loi MOLLE (loi de Mobilisation pour le Logement et la Lutte contre l'Exclusion) du 25 mars 2009.

Enfin, l'échelle de réseau (ou d'interactions entre individus) met en évidence les positionnements différenciés des trois processus à l'étude. En effet, les interactions impliquées au cours d'un événement hydrométéorologique s'étendent de la cellule familiale (échelon le plus important lors de décision d'évacuation notamment) à la société, lorsque l'événement est suffisamment fort pour mobiliser les individus bien au delà des cercles de connaissances directes comme dans le cas d'associations de sinistrés par exemple ou de l'aide internationale apportée aux pays subissant des catastrophes majeures. Sur cette échelle, la mobilité quotidienne est principalement modelée par les activités des membres de la cellule familiale et de l'entourage proche : le voisinage par exemple, au travers du développement du co-voiturage. La mobilité résidentielle enfin

implique généralement la seule cellule familiale, sauf lorsqu'il s'agit du déplacement de groupes de population tout entiers, comme c'est le cas de crises migratoires.

Cette première exploration des échelles proposées par Cash, nous a permis d'identifier une à une certaines échelles d'intérêt pour examiner les déterminants de la mobilité et ceux du risque de crue rapide en France. Pour comprendre en quoi les crues rapides sont particulièrement dangereuses pour les personnes en situation de mobilité, il semble maintenant important d'identifier les interactions entre échelles (cross-scale) et entre niveaux (cross-level) qui peuvent être à l'origine de problèmes pendant l'événement. La question qui se pose alors est de conceptualiser les impacts sociaux des événements hydro-météorologiques en adoptant une perspective où les processus comportementaux et environnementaux sont en continuelle émergence et interaction à travers différentes échelles de temps et d'espace. Cette conceptualisation sert de base à la définition d'une méthode d'observation des comportements d'adaptation aux changements environnementaux que nous avons appliquée dans le cadre de cas d'études post-événement appelé *Retour d'expérience socio-hydro-météorologique* dont je reparlerai au chapitre suivant.

2.3 Les pratiques de mobilité quotidiennes à la croisée d'échelles sociales, spatiales et temporelles

Cette section est le fruit d'une réflexion collective initiée il y a déjà plusieurs années dans le cadre du projet ANR Retour Post-doc ADAPTflood (2009-13) que j'ai coordonné à mon retour en France et qui portait sur les dynamiques d'adaptation des mobilités quotidiennes aux situations de crises hydro-météorologiques. La revue de littérature réalisée alors et non publiée à ce jour [Jeuring *et al.* 2013]* que je reprends ici s'est révélée particulièrement fondatrice de notre façon d'aborder l'observation des comportements individuels d'adaptation aux situations de crues rapides décrites dans [Ruin *et al.* 2014].

Notre réflexion prend ses origines dans l'idée que la distinction entre normalité et crise, une dichotomie permettant de distinguer les situations ordinaires des catastrophes [Helsloot et Ruitenbergh 2004, Powley 2009, Garreau *et al.* 2009, Sorensen 1991, Drabek 1999, Patterson *et al.* 2010], limite notre connaissance actuelle des comporte-

ments face au risque. Cette dichotomie ne nous semble pas pertinente lorsqu'il s'agit d'aborder le comportement humain comme un processus dynamique dans lequel la continuité du quotidien tient une place centrale. Nous pensons donc que pour mieux appréhender les comportements humains pendant les épisodes de crues rapides, il faut s'intéresser à la façon dont la vie quotidienne des individus est construite et conceptualiser la capacité à faire face au risque de la même manière. Ainsi, il semble important de s'intéresser aux motivations et aux obligations de la vie quotidienne, à la façon dont elles sont construites et entrent en compétition les unes avec les autres au fur et à mesure de leur émergence à travers le temps et l'espace. Ainsi, les décisions prises pendant le temps court caractérisant les phases de pluie et d'inondations rapides sont imbriquées dans une séquence continue d'activités dans laquelle les individus s'organisent, font sens de la situation, agissant et réagissant de façon simultanée pour s'accommoder de perturbations d'intensités variables. C'est cette imbrication d'activités dessinant un continuum entre activités routinières et réactions aux circonstances plus ou moins extrêmes auxquelles les individus sont confrontés qu'il nous semble important de documenter et de comprendre ces événements socio-hydro-météorologiques, notamment en s'appuyant sur l'observation.

Pour documenter ces interactions entre les dynamiques comportementales et environnementales, nous avons d'abord essayé de comprendre comment se construisent les pratiques quotidiennes et quoi celles-ci sont le fruit de décisions hiérarchiques.

Anderson [1995] identifie de nombreuses caractéristiques propres aux activités de la vie quotidienne. Selon lui, elles peuvent être mondaines ou communes mais surtout elles requièrent peu d'efforts cognitifs car elles sont exécutées sur la base d'expériences passées. Elles sont surtout en perpétuel recommencement, se chevauchant, se contredisant et interagissant les unes avec les autres de façon non-linéaire. Cela implique que les individus sont en constante négociation sur ce qu'ils doivent faire, tenant compte du passé, du présent et de leurs projets futurs. Même si nombre de ces activités paraissent simples en elles-mêmes, leur exécution requière néanmoins beaucoup de connaissances et de compétences car elles ne sont pas uniquement répétitives mais peuvent être constituées de nouvelles activités ou circonstances qui demandent un effort cognitif croissant et une adaptation incessante. La vie quotidienne est donc rythmée au fil des routines et des habitudes, perpétuellement intercalées de ruptures, suspensions, interférences et d'actions réparatrices [Trentmann 2009].

Selon Van Acker *et al.* [2010] les comportements quotidiens sont le résultat d'une structure de décision hiérarchique allant des décisions de court terme relatives aux

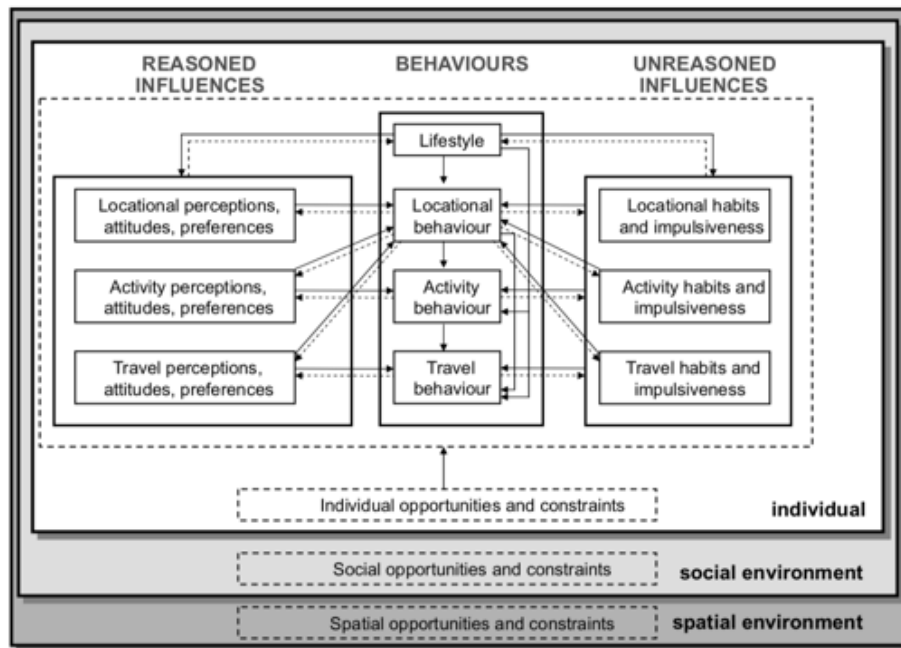


FIGURE 2.7 — Modèle conceptuel des processus de décision à l'origine des pratiques quotidiennes selon Van Acker *et al.* [2010]

activités quotidiennes, de moyen terme relatives aux choix résidentiels et de long terme relatives au style de vie. Ces auteurs proposent ainsi un modèle conceptuel plaçant les comportements individuels au centre de réseaux d'influences raisonnées et non-raisonnées qui forment un ensemble également soumis aux opportunités et contraintes présentes dans l'environnement social et spatial (Figure 2.7).

Sur le temps court, c'est à dire aux échelles de temps qui résonnent particulièrement avec celles des crues rapides, les travaux de la *Time-geography*, initiés dans les années 70 par Hägerstrand [1970], nous informent sur les caractéristiques spatiales et temporelles des activités quotidiennes. La réalisation de ces pratiques est le fait de la co-occurrence de ressources matérielles/biophysiques, cognitives (volonté, connaissance, perception...) et socio-culturelles (règles et lois propres à la société dont l'individu fait part) [Hägerstrand 1970, 1985, Chardonnel 2007]. La *Time-Geography* s'est dotée d'un système de représentation graphique qui, à la différence des échelles spatio-temporelles utilisées par les physiciens, représente les trajectoires individuelles dans un cube dont deux dimensions représentent l'espace géographique sous forme de plan (pour suivre les déplacements d'un point A à un point B) et la troisième dimension, celle du temps, est représentée par un axe chronologique vertical. Un autre mode de représentation utilise la notion de prisme spatio-temporel journalier figurant la quantité d'espace-temps qu'un individu passe en dehors de son domicile. Ce volume, conditionné par

les horaires de départ et de retour au domicile, considère la portion d'espace maximale accessible pendant le temps passé hors domicile. Celui-ci prend donc en compte à la fois la vitesse de déplacement lié aux moyens de transport utilisés et la nécessité de visiter certains endroits spécifiques à des moments précis de la journée. Dans l'objectif d'analyser les comportements individuels, la *Time-Geography* s'intéresse également aux trois types de contraintes qui influencent les trajectoires individuelles : i) les contraintes de capacité associées aux limites physiologiques qui nous obligent à prendre le temps de dormir, manger et se soigner, ii) les contraintes de couplage relative à la nécessité d'interagir avec d'autres individus (dans le cadre du travail ou de l'organisation familiale par exemple), iii) les contraintes d'autorité qui régissent l'accès dans le temps et dans l'espace aux lieux d'activités.

Dans notre quête d'approches pour comprendre comment les personnes construisent les trajectoires spatio-temporelles qui rythment le contenu de leur vie quotidienne, nous avons également besoin de nous focaliser sur les projets qui constituent des motivations à l'action. Ainsi ces projets peuvent être de court ou de long termes comme pour la récupération d'un enfant à l'école ou pour son éducation à plus longue échéance [Chardonnel 2007]. La réalisation de ces projets passent par la structuration de séquences d'activités spécifiques requérant des ressources temporelles et spatiales qui sont parfois incompatibles à la réalisation de plusieurs projets à la fois. L'intérêt de se concentrer sur le projet à l'origine d'un comportement particulier à l'instant t est d'explicitier la façon dont les individus définissent leur priorité entre plusieurs projets souhaitables et donc plusieurs objectifs. En négociant de façon permanente entre leurs projets et les contraintes spatio-temporelles qui leurs sont imposées, ils définissent un certain ordre qui leur permet de maintenir la continuité de leurs activités quotidiennes à travers l'espace et le temps. Ainsi, prioriser et basculer d'un projet à l'autre caractérise la façon dont les individus s'adaptent aux circonstances changeantes.

Les recherches sur les programmes d'activités (*activity-based approach*) et les budgets-temps ont produit de nombreuses connaissances sur les trajectoires spatio-temporelles des individus ainsi que sur la construction de routines à plus grande échelle [Kitamura 1988, Jones et Clarke 1988, Axhausen *et al.* 2002, Gärling et Axhausen 2003, Ettema *et al.* 2007, Neutens *et al.* 2011]. De telles études utilisent des méthodes longitudinales de collecte de données telles que les enquêtes "emploi du temps" (*diaries*) permettant d'observer la distribution temporelle des activités sur plusieurs journées. Ce mode de collecte permet à la fois d'envisager la façon dont sont construites les séquences d'activités routinières mais également de comprendre dans quelles circonstances les indivi-

des s'éloignent de leur emploi du temps habituel ou prévu. Ces travaux montrent que les individus organisent leurs activités quotidiennes différemment selon les jours de la semaine et du week-end et identifient trois principales catégories de facteurs influençant cette organisation :

- Les facteurs liés aux caractéristiques socio-démographiques de l'individu (l'âge, le genre, la profession...) et au cycle de vie du ménage (le nombre d'enfant, le statut familial, le nombre de voiture par ménage) [Lu et Pas 1999, Ettema et Lippe 2009, André-Poyaud *et al.* 2016],
- Les facteurs liés au contexte environnemental, tel que l'accessibilité spatiale (configuration du réseau et condition du trafic) et temporelle (horaires d'ouverture et de fermeture des services/commerces/emplois) des lieux d'activités [Fosset *et al.* 2016].
- Les facteurs liés à la flexibilité des activités : [Damm et Lerman 1981] définissent la flexibilité d'une activité comme le degré auquel l'implémentation de l'activité peut être modifiée du point de vue spatial (changement de lieu d'activité) et temporel (horaire et durée de l'activité). Ainsi, certaines activités sont plus prioritaires que d'autres et sont alors planifiées en premier lieu et peuvent difficilement être modifiées ou annulées. Selon Cullen et Godson [1975] les contraintes temporelles sont moins flexibles que les contraintes spatiales. De plus, certaines activités telles que le travail sont moins flexibles et agissent comme des ancrages ("pegs") autour desquels d'autres activités peuvent être arrangées selon leur flexibilité.

Si les pratiques du quotidien sont le résultat de décisions de court-terme concernant la participation à différents types d'activités, elles sont aussi dépendantes de choix de moyen terme concernant le lieu de résidence ou de travail. Ainsi, les opportunités d'activités sont fonction de leur disponibilité spatiale et temporelle dans un périmètre autour des lieux de vie. Si les activités disponibles ne répondent pas aux besoins des individus ceux-ci peuvent ainsi remettre en question leur choix de lieu de vie. C'est par exemple le cas lorsque les enfants grandissent en même temps que leurs besoins de mobilité, ce qui conduit parfois les parents à se rapprocher des centres urbains mieux desservis par les transports en communs. Ce type de décision de moyen-terme est généralement bien réfléchi et mis en oeuvre uniquement lorsque les ajustements de court-terme ne sont pas soutenables. Evidemment, ce changement de lieu de vie modifie en profondeur les caractéristiques spatio-temporelles des pratiques quotidiennes. Des études récentes montrent ainsi que les choix résidentiels ne sont pas seulement

influencés par des préférences en termes d'environnement construit mais également en termes d'activités et de transport [Mokhtarian et Cao 2008].

Finalement, s'il est important d'envisager les pratiques quotidiennes comme une déclinaison à plus petite échelle de choix résidentiels de moyen terme, celles-ci s'expliquent également par des décisions de plus long terme ayant trait au style de vie Salomon et Ben-Akiva [1988]. Selon Van Acker *et al.* [2010] (citant Ganzeboom), les individus affirment leur position sociale à travers un patron de comportement déterminé par leur style de vie. Le style de vie comporte trois dimensions : i) économique, ii) culturelle, iii) une dimension correspondant à la phase ou cycle de vie (telles que définie par des variables socio-économiques qui évolue au cours d'une vie : profession, composition du foyer, âge...). Ces dimensions, internes à l'individu et non observables, conditionnent néanmoins les orientations sur le plan familial, professionnel, résidentiel, de la consommation et des loisirs qui s'expriment dans les comportements du quotidien. Cependant, si le concept de style de vie possède un certain pouvoir explicatif, il semble être moins influent que certaines variables socio-économiques et démographique [Van Acker *et al.* 2010].

Les approches issues de la *Time-geography* sont parfois critiquées car trop focalisées sur les *patterns* spatio-temporels et les contraintes imposées par l'environnement physique laissant ainsi de côté les aspects cognitifs contribuant à la priorisation d'un projet plutôt qu'un autre. Ainsi l'observation des trajectoires spatio-temporelles peine à expliquer pourquoi les individus ont choisi un itinéraire plutôt qu'un autre, pourquoi ils ont pris le vélo plutôt que la voiture ou dans le cas des crues rapides pourquoi ils retardent, anticipent ou annulent leurs déplacements habituels. Pour comprendre comment les individus jonglent entre différents projets dans un environnement marqué de constantes perturbations, il faut s'intéresser aux processus cognitifs permettant la prise de décision et l'ordonnancement des différentes activités de la vie quotidienne et la priorisation des actions en situation d'urgence. Comme nous allons le voir dans la section suivante cette question s'intéresse aux deux modes comportementaux évoqués précédemment : les comportements raisonnés et non raisonnés et à la façon dont ceux-ci sont liés aux perceptions et représentations mentales de l'individu vis à vis de son environnement, de ses projets, et de l'efficacité des différentes options qui s'offrent à lui.

2.4 Processus décisionnels : des comportements routiniers à la mise en protection face au danger

Les routines et les rythmes de la vie quotidienne se construisent en directe interaction avec l'environnement social et physique dans lequel ils prennent place. Les actions mises en oeuvre sont ainsi le fruit d'un processus complexe et continu visant avant tout la continuité des activités de la vie quotidienne malgré la part discontinue et imprédictible qui caractérise les dynamiques de l'environnement physique et social dans lequel elles prennent place [Henry 2011, Shove *et al.* 2009]. Selon [Muhren *et al.* 2008] (citant Karl Weick), la discontinuité est la règle et la continuité l'exception. C'est ce qui rend la limite entre normalité et crise diffuse et difficile à déterminer. Ainsi, même si la dichotomie entre situations "normales" et de "crises" paraît attractive pour classer les situations à risque, elle est plus problématique lorsqu'on adopte une approche dynamique du sujet.

Cette dichotomie implique qu'il y a un changement soudain et radical de la situation, un moment qui découpe le temps continu d'un événement en un "avant" et un "après" sur la base d'un incident fondateur qui définit l'instant de référence des actions d'adaptation. Pour certains aléas naturels dont la survenance est instantanée, brutale et imprévisible, tels que les séismes, l'instant fondateur à l'origine du changement de situation est plus facile à établir même si la survenance de répliques plus ou moins intenses vient compliquer le problème. Dans le cas des crues rapides comme d'autres types d'événements plus progressifs, la détermination du moment qui caractérise le début de l'événement est particulièrement difficile pour plusieurs raisons qui tiennent à la fois à la complexité du phénomène (qui est le fruit de la distribution spatio-temporelle des pluies et de la réponses différenciées des bassins versants selon leurs tailles) et à la sensibilité perceptive intrinsèque des observateurs humains et leur disponibilité d'esprit selon l'activité en cours. C'est pourquoi il est également important de s'intéresser aux multiples échelles des perturbations imposées par les phénomènes de crues rapides pour envisager la façon dont celles-ci sont perçues et prises en compte de manière dynamique pour maintenir la continuité des activités quotidiennes.

Avoir la capacité d'adapter son quotidien aux circonstances changeantes (de développer une routine résiliente) est une obligation quelque soit le niveau de l'action étudiée. Par exemple, Ingold [2011] décrit les capacités qui sont selon lui nécessaires pour réaliser une action aussi simple que scier une planche en bois :

“Sawing calls for manual dexterity. I contend that the essence of dexterity lies in the carpenter’s capacity to bring into phase an ensemble of concurrent movements, both within and beyond the body. It is this attunement that makes the activity rhythmic rather than metronomic. Far from being merely habitual or ‘done without thinking’, such rhythmic activity calls for intense concentration. This concentration, however, is that of a consciousness that is not confined within the head of the practitioner but reaches out into the environment along multiple pathways of sensory participation” (p.18).

A la différence du problème mono-scalaire qui consiste à scier une planche (interaction de la scie avec la structure du bois), l’inondation et plus particulièrement les crues rapides constituent un problème multi-scalaire analogue à celui posé au buche-ron lorsqu’il coupe un arbre. En effet, dans cette activité celui-ci doit non seulement scier le tronc en adaptant son mouvement à la structure du bois, mais aussi veiller à diriger le mouvement d’ensemble de l’arbre pour s’assurer que celui-ci tombera où il l’a prévu.

Comme je l’ai déjà évoqué, plusieurs échelles gouvernent les dynamiques de crues, celles de la pluie et celles des bassins versants avec lesquels elle interagit. Ces interactions contrôlent la vitesse de survenue des réponses hydrologiques et leurs intensités, produisant des pics de crues asynchrones sur l’ensemble de la région affectée [**Creutin et al. 2013**]. Ainsi, selon l’endroit où se trouvent les personnes, s’ils elles restent dans un lieu fixe ou si elles sont mobiles, elles sont exposées à des menaces très différentes qui varient de l’arrivée soudaine et brutale des eaux de ruissellement issues de très petits bassins versants à la réponse beaucoup plus lente et prévisible d’une grande rivière. Une telle diversité de dynamiques interfère avec les rythmes et les routines des activités quotidiennes, forçant les individus à mettre en oeuvre de micro-ajustements leur permettant de se déplacer en condition de pluie, d’autres adaptations de méso-échelle consistant à changer d’itinéraire pour éviter les zones inondées ou des changements de macro-échelle allant jusqu’à l’annulation de leurs projets du jour dans le but de se mettre en protection.

Néanmoins le choix du type d’adaptation à mettre en oeuvre selon les circonstances n’est pas trivial. Ainsi, qu’il s’agisse de choix du domaine de la vie quotidienne ou de choix face à une situation menaçante, les termes de “comportements irrationnels” sont bien souvent employés pour parler d’actions qui, du point de vue d’un observateur extérieur, sont considérées comme irréfléchies, inappropriées aux circonstances, si ce n’est stupides. A titre d’exemple je peux citer les termes employés par le journal hebdomadaire de la ville d’Aurora, dans l’Etat du Colorado (USA), l’*Aurora Sentinel*, qui écrivait

le 19 septembre 2013, quelques jours après l'épisode dramatique de crues rapides qui a touché la région des *Front Range* :

“Flood drivers through doubt on intelligent life in Aurora. In fact after observing how many Aurora residents handled themselves during the Flood of 2013, I’m surprised the local gene-pool doesn’t shrink dramatically every day. There are really a lot of really stupid people here. These are the people who - in the middle of a torrential downpour, after the city began to flood, after the flooding was apparent and widespread - would purposely drive their cars into lakes of water”.

En fait, ce type de terminologie péjorative est souvent utilisée de façon inconsidérée car l'évaluation de l'observateur se fait sans considération de la situation perçue et des buts visés par le décisionnaire. Là encore, la réaction des lecteurs à l'article cité précédemment est particulièrement éclairante sur la différence de point de vue entre observateur extérieur et décisionnaire :

“Some people still have to work... My husband’s company refused to close, even though the intersection was a lake, and he still had to go to work”.

Aussi pour mieux comprendre les comportements observés, la section suivante s'intéresse aux théories de la psychologie sociale qui nous informent sur les différents modes comportementaux associés aux actions de la vie quotidienne et aux déplacements.

2.4.1 Pratiques de mobilité quotidiennes : automatismes comportementaux ou actions délibérément réfléchies ?

Les théories de la psychologie sociale s'intéressent à la façon dont les individus réfléchissent, éprouvent des émotions et se comportent, en portant une attention particulière à l'influence de l'environnement social sur ces processus. En particulier l'étude des attitudes, considérées comme une forme de réponse à un stimuli, identifie le comportement passé, l'intention et la situation (pensée en termes d'opportunités et de contraintes) comme des déterminants potentiels des comportement individuels [Gärling et Axhausen 2003]. Plusieurs théories, telles que la théorie de l'action raisonnée (*Theory of Reasoned Action*) ou celle du comportement planifié (*Theory of Planned Behaviour* -TPB) considèrent un comportement comme le résultat d'un choix rationnel dépendant de deux facteurs, l'intention et la capacité objective à agir (*actual behavioural control*)

[Ajzen 1991]. Selon la théorie du comportement planifié, l'intention, c'est à dire la motivation à agir est le fruit de trois ingrédients, l'attitude vis à vis de l'action, la norme subjective et la perception de l'individu en sa propre capacité à réaliser l'action envisagée (*perceived behavioural control*). La norme subjective se réfère à la pression sociale (en particulier celle des proches dont le jugement compte) ressentie par l'individu vis à vis du comportement en question et son souhait de s'y conformer (ou non). Le modèle TPB est une forme de la théorie de l'utilité espérée subjective (*Subjective Expected Utility - SEU*) basée sur l'hypothèse que les individus effectuent des choix raisonnés en fonction de l'évaluation subjective des conséquences des actions qu'ils envisagent de réaliser.

Néanmoins, plusieurs études ont montré que les comportements n'étaient pas toujours le fruit de décisions mûrement réfléchies notamment lorsque les comportements en question concernent la vie de tous les jours et les pratiques habituelles et répétitives [Trandis 1980, Ronis *et al.* 1989]. Selon ces auteurs, les comportements routiniers sont des séquences d'actions spécifiques qui à force de répétitions deviennent automatiques et ne demandent plus de réflexion préalable. D'après Aarts et Dijksterhuis [2000] ces routines sont conditionnées par des représentations mentales associant des objectifs à des réponses comportementales ayant jusque là été expérimentées avec succès, ainsi l'activation d'un objectif abouti de façon automatique à la mise en oeuvre de la séquence d'actions associée. La construction de cet automatisme devient *script-based*, selon l'expression de Gärling et Axhausen [2003], à partir du moment où il n'y a pas formation d'une intention requérant une recherche et un traitement délibéré d'information avant la réalisation de l'action. Néanmoins ce n'est pas parce qu'un comportement est répétitif qu'il est nécessairement routinier, il est donc important de faire la distinction entre comportement délibéré et automatique sur la base de la quantité et la profondeur du processus de traitement de l'information associé. Selon Gärling et Axhausen [2003], il faut également être attentif à différencier les comportements planifiés des comportements impulsifs, dans le sens où ces derniers sans être automatiques demandent peu de délibération car ils sont suscités par une intention tardive laissant peu de temps à la réflexion. Une caractéristique importante des comportements routiniers concerne leur persistance et leur inertie. Sortir d'un comportement routinier demande un effort d'attention et l'apprentissage d'une nouvelle routine coûteuse d'un point de vue cognitif [Aarts et Dijksterhuis 2000]. Par ailleurs, la recherche et le traitement de l'information étant réduit à son minimum lors de la mise en oeuvre d'un comportement routinier, la sensibilité aux changements et stimuli issus de l'environnement extérieur s'en trouve réduite ce qui peut avoir des conséquences importantes lorsque les circonstances en-

vironnementales deviennent menaçantes.

En contexte perturbé, lorsque les projets et objectifs en cours peuvent temporairement devenir inappropriés ou irréalisables, la capacité à faire face repose sur la façon de reconsidérer le sens de ces objectifs, projets et actions au regard des nouvelles circonstances. Plusieurs études montrent le rôle que jouent les constructions mentales hiérarchiques qui reflètent la façon dont les individus perçoivent ce qu'ils font et la valeur qu'ils attribuent à leurs actions. Selon Weiss *et al.* [2010], les individus prennent des décisions de façon à maximiser leur utilité. Mais la perception de l'importance de cette utilité varie selon les personnes, et pour une même personne elle varie également au cours du temps et selon le contexte. Ainsi, le *descriptive multi-attribute utility model* proposé par Weiss *et al.* [2010] diffère du SEU par la prise en compte du paramètre de saillance momentanée (*Momentary Salience*) en plus de la valeur subjective perçue et de la probabilité subjective. Si la valeur et la probabilité subjectives concernent la perception des conséquences que l'individu anticipe et de leurs probabilités d'occurrence, la saillance momentanée se réfère à l'importance perçue d'une conséquence particulière au moment de la décision, c'est à dire dans le contexte spécifique où la décision est prise. Par exemple dans une situation de crue rapide, un individu allant au travail peut se retrouver en situation de devoir prendre la décision de traverser ou non des portions de routes submergées. Il peut ainsi anticiper plusieurs conséquences : i) s'inquiéter que son arrivée au travail soit retardée s'il cherche un itinéraire plus sûr, ii) s'inquiéter pour sa voiture ou même pour sa vie s'il tente de traverser les portions inondées. Ainsi en fonction des circonstances du moment l'individu va envisager l'une des conséquences comme plus saillante que l'autre. S'il ressent une forte nécessité d'être à l'heure au travail ce jour là et/ou qu'il voit la voiture devant lui passer sans trop d'encombre, il aura probablement tendance à tenter une traversée de la chaussée inondée. Dans le cas où sa motivation à être à l'heure au travail est moins grande et/ou la voiture devant lui se retrouve coincée au milieu des flots, il semble plus probable qu'il choisissent de faire demi-tour. Finalement, le concept de saillance momentanée permet également de prendre en compte la faible disponibilité d'esprit et capacité de calcul du cerveau humain qui est rarement en mesure de considérer et d'évaluer toutes les options disponibles à lui, d'autant plus dans un contexte où la pression temporelle est forte.

Selon Weiss *et al.* [2009] il existe un lien entre la structure hiérarchique des décisions du quotidien et le type de processus de décision. Ainsi, ces auteurs considèrent que les grandes décisions (*big decision or personal policy*) visant à réaliser des objectifs de long terme, sont généralement le fruit d'un processus de réflexion pendant lequel toutes

les conséquences probables sont considérées comme saillantes. Une fois ces grandes décisions mises en place, elles gouvernent et facilitent la prise de décisions de plus bas niveau, appelées petites décisions, qui ne nécessitent quasiment plus de réflexion et permettent une action plus rapide. Si une situation ne se réfère à aucune grande décision en place, l'action sera impulsive, c'est à dire que la délibération concernant l'évaluation des conséquences se réduit à la conséquence la plus saillante au moment d'agir. Ainsi, Weiss et Weiss [2012] définissent comme irrationnelles les petites décisions qui ne sont pas cohérentes avec la politique individuelle mise en place à l'échelle des grandes décisions et expliquent cette incohérence par les circonstances de la décisions qui font ressortir la forte saillance momentanée d'une solution hors politique. Il est classique de penser que si la personne décisionnaire avait eu une connaissance appropriée, elle aurait fait un choix comportemental adéquate. Néanmoins d'après ces mêmes auteurs, une bonne connaissance permet d'influencer les paramètres de valeur et de probabilité subjectives, mais il n'affecte pas le paramètre de saillance momentanée qui conditionne fortement les petites décisions [Weiss et Weiss 2012].

La compréhension des décisions en matière de vie quotidienne ou d'adaptation aux perturbations passe également par l'appréhension des schémas ou représentations mentales (encore appelées cartes mentales) qui se construisent sur le long terme par le truchement d'expériences personnelles directes, d'apprentissage et d'échange avec des pairs ou d'exposition passive à l'information médiatique. En effet, ces cartes mentales sont des représentations de la façon dont le monde réel fonctionne et à ce titre elles constituent un filtre par lequel l'Homme sélectionne et interprète les circonstances qu'il est capable de percevoir au travers de ces cinq sens avant de choisir comment procéder. Ce type d'approche est utile pour comprendre comment les individus décident de réaliser un projet plutôt qu'un autre. Par exemple, Hannes *et al.* [2012] étudient les représentations mentales pour comprendre les choix en matière de mode de transport en se basant sur l'idée que les individus construisent une représentation mentale temporaire et spécifique de la situation réelle qui leur permet de prendre une décision. De cette façon, chacun évalue les multiples opportunités de résoudre le problème en tenant compte de son contexte personnel à l'instant t, des moyens et outils à sa disposition et de l'utilité et des buts qui sont visés par la réalisation d'une action.

Graphiquement, cela peut-être représenté par un réseau de décision "decision network" composé de noeuds et de liens (Figure 2.8). Les noeuds peuvent être soit des noeuds de décisions (les différentes options possibles), soit des noeuds aléatoires (représentant les variables descriptives du problème), soit des noeuds d'utilité (représen-

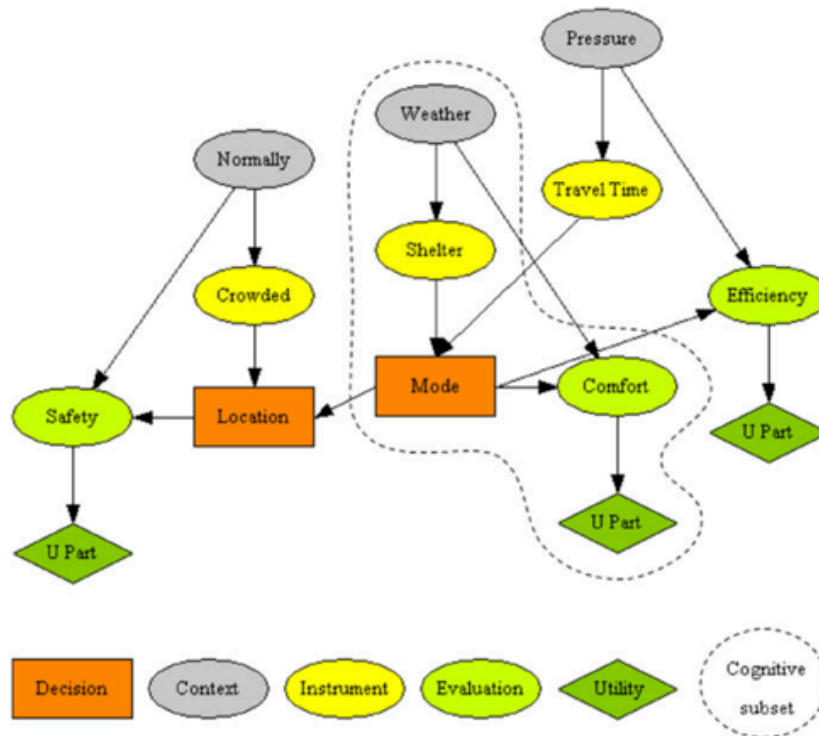


FIGURE 2.8 — Exemple de réseau bayésien proposé par Hannes *et al.* [2012]. Trois types de nœuds sont représentés : les nœuds de décision (rectangles), les nœuds aléatoires (ovales) et les nœuds d'utilité (losange)

tant l'objectif spécifique finalement visé). Les noeuds qui sont reliés entre eux par des arcs représentant des liens de dépendance forment un sous-ensemble cognitif. Un réseau de décisions peut ainsi comporter plusieurs décisions interreliées, elles-mêmes potentiellement composées de plusieurs sous-ensembles cognitifs. Ce type de réseau sert de base à la modélisation probabiliste utilisée par les modèles multi-agents et les réseaux Bayésiens [Sedki et Beaufort 2012, Hannes *et al.* 2012, Moss et Edmonds 2005, Tubaro et Casilli 2010, An 2012]. L'intérêt de ce type d'approche graphique, transposable en système d'équations Bayésiennes, est de permettre de transformer des données qualitatives caractérisant les processus décisionnels en modèle comportemental à visée prédictive.

Si les décisions de la vie quotidienne et celles prises en réponse à un danger sont deux pôles d'un même continuum, la section suivante propose d'investiguer la transition entre ces extrêmes. Cette section explore divers apports théoriques issus des sciences sociales pour envisager la manière dont différents individus vont détecter, percevoir, faire sens et réagir à des perturbations d'intensités variables selon leur perception de la situation, des solutions qui s'offrent à eux et de leurs motivations à agir.

2.4.2 Processus décisionnels en contexte de risque et d'incertitude

Si les approches cognitives et comportementales focalisées sur le quotidien comportent de nombreux enseignements pertinents pour mes recherches, il existe également une littérature non moins volumineuse portant sur les perceptions face au risque, les décisions en contexte d'incertitude et de stress [Slovic 1987, Drabek 1999, Kahneman 2003, Wachinger et Renn 2010, Bubeck *et al.* 2012, Eiser *et al.* 2012, Kellens *et al.* 2013].

Ces recherches montrent que si les facteurs cognitifs ont été largement étudiés, ils peinent à expliquer la variété des comportements de protection face à l'imminence d'un danger. Ainsi les chercheurs en psychologie et neurosciences ont montré l'importance du rôle des affects et des émotions comme médiateurs essentiels à la prise de décision dans un contexte de risque et d'incertitude [Damasio 1994, Loewenstein *et al.* 2001, Finucane *et al.* 2000, Finucane et Holup 2006, Slovic *et al.* 2004]. Ces travaux développant la théorie du *risk-as-feeling* s'intéressent plus particulièrement aux émotions anticipatoires plutôt qu'aux émotions anticipées généralement considérées dans les théories cognitives. Les premières sont des émotions viscérales vécues au moment de la prise de décision au contraire des secondes qui ne sont pas vécues immédiatement mais envisagées comme le résultat des conséquences escomptées [Loewenstein *et al.* 2001]. Selon Damasio [1994] l'approche rationnelle coûts/bénéfices, même subjective, de la prise de décision ne peut être la seule alternative car elle demande un temps de raisonnement et une capacité d'attention et de mémoire trop importants et n'empêche pas les erreurs liés aux biais heuristiques identifiés par Kahneman et Tversky [1983]. Selon lui, les sensations corporelles somatiques (*somatic marker*) ressenties agissent comme un système d'alarme pour signaler les choix comportementaux dangereux et les éliminer automatiquement de la liste des options possibles. Ces réactions émotionnelles sont suscitées par des représentations mentales vivaces des conséquences possibles et initiées par des facteurs conjoncturels. Complémentaire au système cognitif (ou raisonné) ce système de réaction émotionnelle permet une réponse plus automatique et rapide et tend à favoriser les comportements prudents.

Les travaux de recherche dans le domaine du risque et des catastrophes d'origine naturelle viennent apporter un éclairage complémentaire. En effet, de nombreuses études empiriques, conduites depuis plus de 50 ans dans la lignée des travaux initiés par Enrico Quarantelli et Russell Dynes au Disaster Research Center (Delaware, USA) et Gilbert White au National Hazard Center (Colorado, USA), ont été à l'origine de modèles

explicatifs des réponses humaines aux aléas et catastrophes naturelles. Parmi ceux-ci, je me suis intéressée aux travaux portant sur les comportements de protection face à un danger immédiat (*disaster or coping response*) et de réponse aux alertes via le modèle PADM (*Protective Action Decision Model*) développé par Lindell et Perry [2003] qui rassemble les principaux apports théoriques et empiriques dans ce domaine de recherche. Selon ces auteurs :

[...] human behavior in disaster can be conceptualized as a process of adapting conventional behavior in an effort to respond to the novel (and imperfectly understood) demands of a changing environment. An actual or impending change in the environment that is diagnosed as threatening stimulates individuals to reexamine their activities in a process referred to as arriving at a new or different "definition of the situation." (p.47)

Ainsi Lindell et Perry [2003] considèrent que le processus de décision de mise en protection est séquentiel. Il est initié par l'occurrence d'un signal, qu'il soit d'origine environnementale (*environmental cues*) ou sociale (message d'alerte), qui enclenche des processus pré-décisionnels stimulant soit le processus de décision, soit un processus de recherche d'information. Ce modèle met en avant plusieurs facteurs initiateurs du processus de décision et de mise en protection. Ces facteurs, que nous appellerons ici des « précurseurs », ont traités aux différents contextes de la situation d'action. Parmi ceux-là, le contexte environnemental, concerne les processus physiques qui déterminent la vitesse d'occurrence, la magnitude, l'étendue et la durée de l'événement perturbateur, et la présence (ou non) de signaux à partir desquels l'observateur peut détecter la survenue d'une menace. Le contexte social ensuite, relève de l'observation et de l'interprétation du comportement des autres. Le contexte d'alerte, qu'il s'agisse d'un message officiel ou non, relate les caractéristiques du contenu et de la transmission des informations distribuées en amont de l'événement. Enfin, les caractéristiques personnelles de la personne alertée sont également à prendre en compte : ses qualités physiques, psychomotrices, cognitives et son capital social conditionnant son accès à l'alerte et sa capacité à réagir face à l'imminence de la menace.

Les processus pré-décisionnels principalement non conscients sont nécessaires pour prendre conscience du risque associé à la situation. Cette conscientisation n'est possible que si un signal d'alerte est perçu, qu'il reçoit l'attention nécessaire et qu'il est bien interprété ou compris. Ces processus sont déterminés par les préconceptions, les demandes d'attention concurrentes et le caractère intrusif de l'information.

Dans le cas des crues rapides, plusieurs difficultés peuvent déjà intervenir à ce

niveau. D'une part, les spécificités du phénomène hydro-météorologique posent un problème de détection aussi bien à l'échelle des experts prévisionnistes, que des non experts qui sont susceptibles d'adapter leurs comportements sur la base de stimuli environnementaux, sociaux ou informationnels constituant un puzzle incomplet et parfois incohérent. Ainsi en matière de prévision, l'incertitude associée à la localisation des intensités de pluie les plus fortes aboutissent à une mise en vigilance pour les événements pluie-inondation à l'échelle de l'ensemble d'un département, voir de plusieurs. Ce manque de résolution spatiale et temporelle peut conduire à ne pas recevoir l'information à temps ou à penser qu'elle n'est pas digne d'intérêt car trop générale au regard du lieu spécifique où la personne se situe. En effet la récurrence des vigilances départementales (notamment le niveau de vigilance orange) sur le long terme, alors que seule une petite partie de la population du département est touchée par ces événements généralement localisé dans l'espace, peut contribuer à diminuer la crédibilité du message qui ne joue alors plus son rôle de signal digne d'attention.

Il n'est pas rare également que lors de ces événements le ciel soit parfaitement dégagé à l'aval du bassin versant alors qu'à l'amont un orage crée les conditions propices à une crue rapide. Dans ce cas les personnes situées à l'aval du bassin ne pourront pas observer des signes météorologiques précurseurs mais uniquement des signes hydrologiques lorsque la rivière entrera en crue, ce qui laissera peu de temps pour réaliser ce qu'il se passe. D'autre part, les situations de mobilités, notamment quotidiennes, posent un autre problème, car elles diminuent les chances de percevoir/recevoir un signal d'alerte issu de l'extérieur de l'habitable de la voiture. En effet, le mode "automatique" associé aux pratiques routinières diminue l'attention à l'environnement extérieur. Le fait d'être isolé par l'habitable du véhicule en mouvement réduit aussi la faculté de percevoir sensoriellement les informations venant du dehors. Enfin, les chances de capter les messages d'alertes diffusés dans les médias ou via son réseau social sont plus faibles.

D'après Lindell et Perry [2003] les processus décisionnels se composent de plusieurs étapes qui passent par :

- la **croissance en la menace**, qui permet d'envisager l'interruption de ses activités normales pour considérer les options de protection.
- **l'évaluation du danger pour soi**, aussi appelée "personnalisation de risque" par Mileti [1995], consiste à considérer sa propre (ou celle de son foyer) exposition au risque et ses conséquences qu'elles soient vitales ou matérielles. Cette étape

conditionne la motivation à se protéger qui est renforcée par la proximité géographique et temporelle du danger, la probabilité d'une réponse immédiate augmentant avec la diminution du temps restant avant l'impact. Quand les personnes considèrent qu'il y a plus de temps que nécessaire avant l'impact, ils peuvent avoir tendance à utiliser ce temps pour chercher de l'information ou protéger des biens ;

- **l'identification des actions de protection possibles** en puisant dans sa mémoire et son expérience personnelle pour faire le lien avec des actions mises en oeuvre lors de situations passées similaires. L'information peut également venir de l'observation du comportement des autres ou d'expériences indirectes transmises par son entourage, les médias ou les autorités en charge de la gestion de crise ;
- **l'évaluation subjective de l'efficacité des actions de protection envisagées** pesées au regard des conséquences associées au maintien de la continuité des activités quotidiennes. L'évaluation peut se faire en termes de temps perçu comme nécessaire à l'action au regard de celui disponible. La perception des freins à l'action entrent également dans la balance (manque d'accès à un véhicule, difficulté physique entravant la mobilité, peur d'être séparé de ses proches, peur d'abandonner ses biens ou ses animaux...) pour contraindre les intentions comportementales. Les coûts peuvent aussi être envisagés comme par exemple la perte de salaire liée à l'annulation de ses activités professionnelles. Cette étape conduit au choix d'un plan d'actions plus ou moins précis pour faire face au danger perçu ;
- **l'implémentation des actions de protection** précédemment identifiées. La mise en oeuvre de ces actions utilise évidemment des ressources (au minimum du temps) qui n'étaient pas prévues pour ça, ce qui peut expliquer que les personnes attendent bien souvent que la menace soit imminente pour justifier de l'interruption de leurs activités normales.

Dans toutes les étapes de ces processus décisionnels, les individus basent leurs réflexions sur l'information disponible et l'interprétation qu'ils en ont. Ce processus de vigilance informationnelle peut être passif ou actif et utilise généralement des sources et moyens de communications variés pour mieux comprendre les tenants et les aboutissants de la situation et optimiser ainsi la réponse. A l'approche de l'impact, si les individus considèrent manquer d'information, ils peuvent alors chercher activement à combler ce manque pour diminuer l'incertitude associée à la situation. Ce processus

peut prendre du temps et diminuer la pertinence d'une action de protection qui aurait pu être appropriée si elle avait été implémentée sans délai. Finalement, la mise en oeuvre réelle d'un comportement de protection est bien souvent soumise aux contingences de la situation, aux éventuels freins physiques, sociaux ou matériels ou au contraire aux opportunités qui se dessinent dans le feu de l'action.

Au contraire des crues lentes causant l'inondation progressive des abords des cours d'eau principaux, les précipitations intenses génèrent à la fois des ruissellements dangereux distribués dans l'espace et les réactions asynchrones de bassins versants de tailles différentes, ce qui n'est pas sans poser problème pour comprendre d'où vient le plus grand danger et appréhender sa dynamique. Faire sens de ce type de situation demande une vision à fine résolution de la dynamique spatiale et temporelle des circonstances. Malheureusement à l'heure actuelle ce type d'information n'est pas facilement disponible quelque soit l'échelle de décision considérée - des individus en charge de leur propre sécurité aux gestionnaires chargés de la sécurité collective. Ainsi il paraît naturel que chaque individu confronté à une situation qu'il considère digne d'attention cherche à s'informer sur les conditions très locales et spécifiques auxquelles il est soumis pour mieux envisager les solutions qui s'offrent à lui.

2.5 Synthèse

L'étude des circonstances des décès lors de crues rapides a révélé la prépondérance des accidents mortels en situation de mobilité, notamment dans le cadre de déplacements routiniers. Comme je l'avais montré dans ma thèse cette observation invite à considérer non seulement les facteurs d'exposition liés à la sensibilité du réseau routier à l'inondation mais également à considérer les pratiques de mobilités quotidiennes comme l'une des sources majeures d'exposition humaine. La considération des échelles spatiales, temporelles et sociales qui caractérisent les processus hydro-météorologiques et sociaux à l'oeuvre nous offre une clé de lecture particulièrement pertinente pour comprendre le danger que représente ce risque scélérat².

Dans le cas des crues éclair, le temps dont disposent les individus pour anticiper le danger varie considérablement dans l'espace et en fonction de la taille du bassin versant en amont du point d'intérêt. A mesure que la surface du bassin versant diminue, le délai entre les précipitations et le pic de crue diminue. Plus ce délai est court, plus le niveau de

²selon l'acception de Dedieu [2013]

L'eau monte rapidement dans la rivière. De plus, l'horaire de survenue du danger varie dans l'espace en fonction des caractéristiques de l'épisode convectif. Ainsi, selon la distribution spatio-temporelle des pluies et l'emboitement des bassins qui les drainent, l'asynchronie des pics de crue lors d'un même événement peut être plus ou moins marquée. La complexité de ces processus physiques rend délicate leur prévision par les experts autant qu'elle complique leur appréhension par les personnes qui sont exposés à ces phénomènes.

Au regard de ces caractéristiques, il est utile de s'intéresser aux dynamiques de mobilité quotidienne qui font varier dans l'espace et dans le temps la quantité d'individus exposés. Ces dynamiques sont en grande partie prévisibles car liées à des pratiques (trajectoires) spatio-temporelles récurrentes gouvernées par des facteurs de plus grandes échelles tels que des choix de moyen terme liés aux lieux de résidence et de travail et de long terme associés au style de vie. Néanmoins quand ces pratiques se trouvent confrontées à la diversité des dynamiques hydro-météorologiques, il est utile de s'interroger sur les processus décisionnels qui permettent (ou non) la transition entre pratiques habituelles ou routinières et pratiques de mise en protection permettant de faire face à l'occurrence d'une menace.

Là encore les questions d'échelles peuvent être mobilisées pour appréhender la structure hiérarchique des décisions du quotidien. Les comportements planifiés, identifiés par certains auteurs comme "grandes décisions", visent à réaliser des objectifs de long terme sur la base d'une réflexion approfondie où toutes les conséquences probables sont considérées saillantes. A l'opposé, les pratiques routinières, peuvent être considérées comme des "petites décisions" qui sont la déclinaison à plus petite échelle des précédentes. Celles-ci permettent une action plus rapide par une activation automatique sans avoir recours à une recherche et un traitement délibérés de l'information. Elles sont également persistantes et présentent une forte inertie. Entre ces deux pôles, par exemple dans un contexte perturbé, peuvent intervenir des décisions impulsives, non automatiques mais provoquées par une intention tardive laissant peu de temps à la réflexion. Dans ce cas, le paramètre de sillance momentanée tenant compte du contexte spécifique où la décision est prise joue un grand rôle. En contexte de danger imminent, les émotions viscérales vécues au moment de la prise de décision apparaissent comme un facteur clé de la réponse comportementale. Les recherches s'intéressant aux comportements face aux alertes montrent que le processus de mise en protection est séquentiel et dépend aussi bien de facteurs cognitifs de long terme liés aux représentations mentales préalables que de facteurs contextuels permettant

d'enclencher les processus de recherche d'information, d'évaluation de la situation et d'action.

Nourrie par des travaux issus de la psychologie sociale et environnementale, de la géographie des mobilités et des travaux interdisciplinaires dans le domaine des risques et des catastrophes naturelles, ce chapitre a permis de présenter le cadre théorique qui a inspiré mes travaux de recherche ces dix dernières années. Forte de ces clés de lecture, mes recherches tentent de comprendre comment les individus réagissent dans ces situations complexes de crues rapides en m'intéressant en particulier à cette période charnière où ils doivent considérer l'abandon de leurs pratiques habituelles et routinières au profit d'actions de protection. L'observation de ces processus de décision *in situ* dans le contexte d'événements de crues éclair peu prévisibles n'est pas triviale. Il s'agit de documenter la variabilité des processus cognitifs et émotionnels et les actions mises en oeuvre pour les analyser au regard de la variété des contextes hydro-météorologiques et socio-spatiaux. Par exemple, il s'agit de tenir compte du fait que si le rythme et le type de réaction peuvent être appropriés pour se protéger d'une inondation lente, la même réponse effectuée au même moment dans un petit bassin à dynamique rapide peut être inadaptée et dangereuse.

Pour évaluer l'adéquation des réactions individuelles à l'aune des dynamiques hydro-météorologiques auxquelles elles se rattachent, nous devons étudier à la fois la dynamique des processus routiniers et la complexité des processus de re-programmation ou annulation de ces activités pour comprendre dans quelle mesure ceux-ci sont liés aux conditions hydro-météorologiques dangereuses. Le chapitre suivant propose de détailler la mise en oeuvre de méthodes d'observation et d'analyse adhoc pour capturer ces phases de transitions comportementales et comprendre les facteurs physiques et socio-psychologiques qui entrent en jeu dans le processus de décision.

Retour d'expériences et analyses couplées des processus socio-hydro-météorologiques

COLLABORATIONS :

A l'IGE : S. Anquetin, B. Boudevillain, L. Creton-Cazanave, J.-D. Creutin, G. Delrieu, J. Jeuring (CDD), S. Shabou (stage Master).

A l'extérieur : C. Lutoff (PACTE), M. Borga (Univ. Padova, IT), E. Gruntfest (Univ. of Colorado, Colorado Springs, USA), A. Scolobig (Istituto di Sociologia Internazionale di Gorizia, IT).

PROGRAMMES DE RECHERCHE : ANR Retour Post-Doc ADAPTFlood, ANR MobiClimEx

PUBLICATIONS : Creutin *et al.* [2009], Ruin *et al.* [2012], Creutin *et al.* [2013], Ruin *et al.* [2014], Drobinski *et al.* [2013, 2014], Delrieu *et al.* [2016], Lutoff *et al.* [2016], Borga *et al.* [2019]

Etudier les effets sociaux des crues éclaircs pose un problème épineux dans la mesure où l'aléa, unique à chaque occurrence, est difficile à généraliser. La difficulté pour l'analyse de ces crues rapides c'est qu'elles sont à chaque fois uniques. En effet, les crues rapides se produisent rarement au même endroit, dans les mêmes circonstances et avec la même intensité. S'il est possible de comptabiliser de fréquentes occurrences de pluies très intenses (>200mm en 24h) à l'échelle d'un département, il est plus rare que celles-ci se produisent plusieurs fois au même endroit (e.g. sur le même pluviomètre) et encore moins sur le groupe de pluviomètres situé sur un même bassin versant provoquant ainsi la réaction violente de celui-ci. De plus, d'un épisode pluvieux à l'autre et également au sein d'un même épisode, les circonstances hydro-météorologiques sont donc très changeantes, chaque épisode constituant ainsi pour les victimes une expérience singulière. Si les coïncidences hydro-météorologiques dangereuses sont moins

fréquentes que les pluies elles-mêmes, la probabilité qu'un même individu assiste deux fois à ces conjonctions particulières l'est encore moins. Ainsi, chaque événement de crue rapide est très spécifique et il est bien rare à l'échelle de la vie humaine de faire la même expérience deux fois. A titre d'exemple, on pourrait citer les épisodes de 2010 et 2011 dans le secteur de Draguignan (Var) et ceux de 2009 et 2015 centrés sur Mandelieu La Napoule (Alpes Maritimes). Si dans les deux cas, la localisation des pluies et les bassins versants affectés étaient similaires, les dynamiques et les temporalités ont été différentes, impliquant d'une part pour les témoins de ces événements des expériences inédites et d'autre part des conséquences en termes d'impacts humains là aussi incomparables.

Comment observer la variabilité des circonstances et des réponses sociales au sein d'un même événement ou d'un événement à l'autre ? Comment comparer ces observations pour évaluer l'influence de différents facteurs contextuels et en généraliser les conclusions ? Si l'observation des précipitations et des réponses hydrologiques sur les bassins versants principaux est assurée par des réseaux instrumentés "relativement fiables", la quantification et la spatialisation précise des pluies et ruissellements associés et l'évaluation des dynamiques de crues dans les bassins versants non jaugés restent une tâche délicate [Gaume et Borga 2008].

Pour ce qui est des comportements individuels et collectifs mis en oeuvre pendant les crises, les difficultés d'observation *in situ* sont d'autant plus grandes qu'aucun réseau d'observation structuré n'existe actuellement même si une quantité incommensurable d'informations, de nature et de fiabilité inégales, circulent notamment depuis l'essor d'internet et des médias sociaux. Néanmoins comme nous l'avons vu au chapitre précédent les réponses individuelles et collectives aux situations de catastrophes naturelles ont été largement étudiées sur le terrain depuis les années 50 par le biais de campagnes de retour d'expérience. A ma connaissance, la collecte conjointe et coordonnées de données permettant de reconstituer à la fois l'évolution des circonstances physiques (hydro-météorologiques) locales et celle des actions individuelles et collectives conduites dans ce contexte spécifique reste très rare. Plusieurs travaux ont souligné l'importance de ces facteurs contextuels, notamment la résonance entre l'heure de survenue de l'événement et les rythmes de la vie quotidienne, sur les réponses aux alertes et les conséquences humaines qui en découlent [Ruin 2010, Terti *et al.* 2017]*. Ces réponses individuelles et institutionnelles sont définies comme multiscalaires et non linéaires et impliquent ce que l'on a appelé la *cognition socialement distribuée* [Dash et Gladwin 2007] qui a poussé Parker *et al.* [2009] à affirmer "*context is everything in unders-*

tanding flood warning response (Parker et al., 2009, p. 104)''.

C'est sur la base de ce constat et de la nécessité de tester des hypothèses liées aux facteurs hydro-météorologiques et sociaux de fines échelles influençant les réponses comportementales que je détaille dans ce chapitre les méthodes de collecte de données spécifiquement développées dans ce but et les analyses couplées des dynamiques socio-hydro-météorologiques que j'ai mises en oeuvre.

3.1 Méthodes de retours d'expériences socio-hydro-météorologiques

Sur la base des enseignements théoriques exposés dans le chapitre précédent et des réflexions qu'ils m'ont inspiré pour l'appréhension des réponses comportementales aux crues rapides, j'ai développé une méthodologie de collecte de données comportementales permettant de tester l'hypothèse selon laquelle à chaque niveau de décision (que cela concerne des individus isolés, des familles ou des groupes organisés), chaque entité sociale s'Informe, s'Organise et se Protège (I-O-P) à sa propre échelle pour adapter sa réaction aux rythmes des circonstances hydro-météorologiques locales. Ainsi à l'échelle d'un événement composé des réponses asynchrones d'une myriade de petits bassins versants distribués dans l'espace, des individus s'assemblent de façon plus ou moins émergente et effectuent des cycles d'actions Information-Organisation-Protection afin de faire face au mieux aux circonstances extrêmement changeantes auxquelles ils sont directement confrontés (Figure 3.1).

Néanmoins la capacité à s'Informé, s'Organiser et se Protéger et à le faire dans un temps compatible avec la vitesse de réponse du bassin versant où se situe l'action tient également aux nombreux facteurs sociaux identifiés par le modèle PADM. Pour tester cette compatibilité, nous avons d'abord proposé de mesurer le temps d'anticipation, défini comme la durée qui sépare la réaction individuelle (I-O-P) du pic de crue pour une taille de bassin versant donnée. Sur la base de l'hypothèse que les réactions humaines suivent les rythmes locaux imposés par les vitesses de réponses des bassins, on pourrait penser que tous les individus soumis à la même dynamique de menace agissent dans le même temps faute de se retrouver en grand danger. Cependant nous faisons également l'hypothèse que la variabilité inter-individuelle du temps d'anticipation par bassin est forte et varie au regard de facteurs tels que la nature, la source, la crédibilité, et la répétition des messages et/ou signaux d'alertes perçus, l'implication dans

Hypothèse : Les réponses sociales se calquent sur le rythme des dynamiques hydro-météorologiques

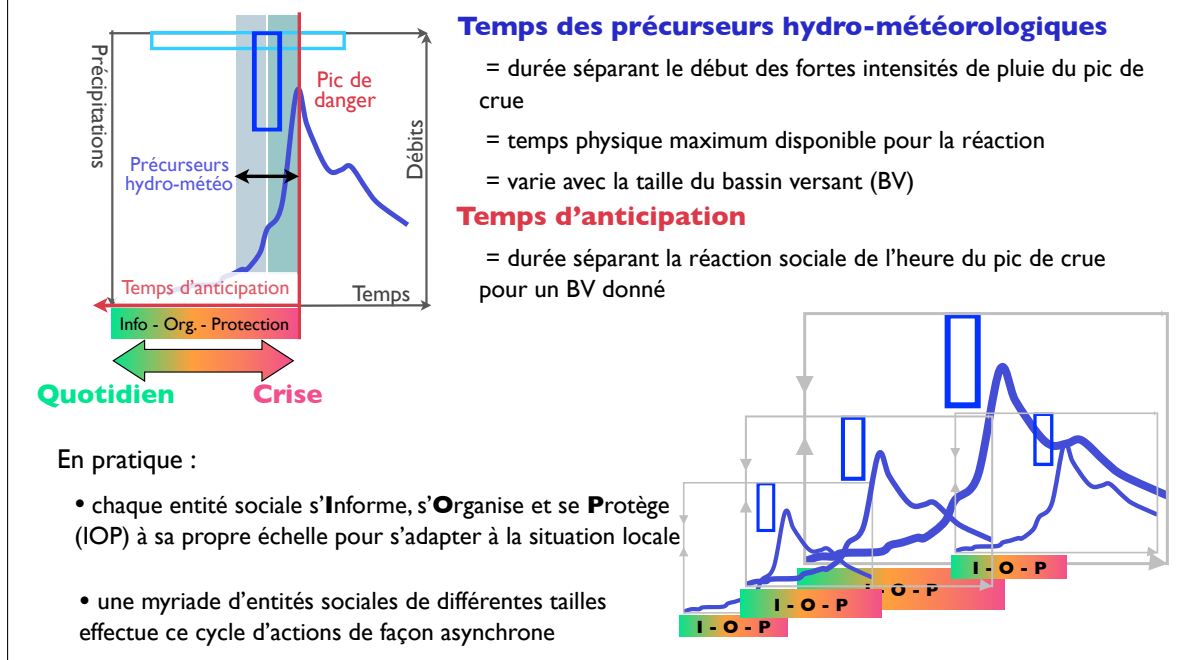


FIGURE 3.1 — Représentation schématique de mes hypothèses et objectifs d'observation couplées des dynamiques socio-physiques

des activités quotidiennes concurrentes mobilisant l'attention, les interactions avec des personnes présentes ou des proches non-présents sur place, l'attachement au lieu, les émotions...

3.1.1 Méthodes de collecte de données croisées

Cette approche demande de collecter des données sur les séquences d'actions (I-O-P) réellement mises en oeuvre lors de crises hydro-météorologiques tout en captant :

- les activités et tâches quotidiennes dans lesquelles elles s'immiscent ;
- les circonstances physiques (signaux environnementaux et conditions hydro-météorologiques) et sociales (messages d'alerte, communications interpersonnelles, comportements des autres...) locales associées aux lieux où se situent chaque action ;
- les expériences perceptives et émotionnelles que ces circonstances ont suscité.

Si la plupart de ces données peuvent être collectées sur la base d'entretiens semi-directifs classiques auprès de témoins d'événements de crues rapides, les hypothèses que j'ai formulées supposent d'établir une connexion entre les circonstances environnementales "objectives" ou physiquement mesurables (intensités et durées des précipitations, dynamiques de crues, vitesses et hauteurs de ruissellement..) et les perceptions et réponses individuelles et collectives que ces circonstances ont induites. Cette connexion ne peut s'établir que par un positionnement temporel et géographique des perceptions et actions considérées auxquelles peuvent être agrégées des données de pluie, de hauteurs d'eau et des vitesses de ruissellement. Ces circonstances hydro-météorologiques éminemment variables dans l'espace et dans le temps, nécessitent de travailler à des résolutions compatibles avec les dynamiques de ces événements, c'est à dire à la résolution infra-horaire et avec une précision spatiale inférieure au kilomètre. Ces contraintes ont été prises en compte dans la réflexion pour la constitution d'une grille d'entretien adaptée à nos besoins de données géolocalisées et temporellement situées. Il a fallu également intégrer le fait qu'au cours des quelques heures que durent un événement de pluie-inondation, les individus peuvent se déplacer soit pour poursuivre la réalisation de leur programme d'activités quotidiennes, soit pour faire face à l'événement [Ruin et Lutoff 2004]. Or cette mobilité les expose à des dynamiques de crues variant avec les tailles des bassins versants qu'ils traversent, compliquant ainsi le choix de la "bonne" réponse à adopter.

La méthode de retour d'expérience (REX) socio-hydro-météorologique que nous avons proposé repose sur deux piliers complémentaires : i) la reconstitution des circonstances hydrologiques à fine échelle (hauteur d'eau, débit, vitesse, timing, extension des surfaces inondées) ; ii) la reconstitution à l'échelle individuelle des séquences d'activités-déplacements, perceptions, émotions et communications interpersonnelles survenues sur toute la durée de l'événement. Cette approche requiert la réalisation de campagnes de terrain post-inondation alliant mesures physiques pour estimer des débits de pointe dans les petits bassins versants non-jaugés, et entretiens auprès des témoins et victimes des crues pour reconstituer les dynamiques d'inondation et celles des réponses sociales. Cette approche interdisciplinaire visant à reconstituer les faits par diverses méthodes complémentaires a été récemment identifiée sous les termes de "forensic analysis" [Borga et al. 2019].

Le volet hydro-météorologique des campagnes de retour d'expérience (REX hydro) n'est pas le fruit de mon travail et a fait l'objet de plusieurs publications détaillant les méthodes de reconstitution des débits de pointe Gaume et Bouvier [2004], Del-



FIGURE 3.2 — Planche photographique illustrant les campagnes de retour d'expérience sur le terrain : a) laisse de crues, b) groupe d'experts réalisant le profil topographique de la section du cours d'eau, c) photo de la crue prise par un témoin utilisée pour l'estimation des vitesses.

rieu *et al.* [2005], Gaume et Borga [2008], Payrastre *et al.* [2012]. Ces reconstitutions se basent sur des mesures topographiques des sections de cours d'eau, le repérage des laisses de crues afin d'estimer les hauteurs d'eau maximales, et l'estimation des vitesses d'écoulement nécessitant bien souvent le recours à des témoignages ou l'utilisation de documents vidéos ou photographiques (Figure 3.2). Cette première prise de contact avec le terrain permet ainsi d'évaluer les dynamiques de crue sur la gamme des échelles spatiales concernées et de repérer des personnes susceptibles d'être interrogées dans le cadre de la campagne d'enquêtes visant la reconstitution des dynamiques de réponses sociales.

Le volet social des campagnes de retour d'expérience que j'ai coordonné vise à retracer les facteurs de transition entre quotidien et crise en examinant la succession des décisions et pratiques individuelles et les conditions socio-environnementales dans lesquelles celles-ci ont été mises en oeuvre. Dans cet objectif nous avons conduit, sur les mêmes terrains d'étude que le REX hydro, une campagne d'entretiens semi-directifs pour collecter les récits des scènes de crise mêlant les histoires individuelles de plusieurs personnes impliquées.

Même si chaque entrevue est extrêmement riche et instructive car elle renseigne les comportements réels et non intentionnels ou virtuels, deux problèmes principaux se posent. Premièrement, en raison de l'émotion liée aux impacts humains, sociaux et économiques des inondations, ces entretiens ne peuvent être menés que quelques semaines ou mois après l'événement, lorsque le sujet est moins douloureux. Une telle temporalité augmente les biais de mémoire et la difficulté de collecter des données à haute résolution spatiale et temporelle. D'après notre propre expérience de ces enquêtes de terrain post-événement, les gens ont tendance à se souvenir beaucoup mieux et avec beaucoup plus de précision de leurs activités et du contexte social et environnemental lorsque les circonstances sont intenses ou menaçantes que lorsqu'ils sont en mode "routine" au cours duquel, comme nous l'avons déjà dit, peu d'effort cognitif est requis. Cette observation est confirmée par plusieurs études montrant que les biais mémoriels sont moins importants lorsque le témoin a été personnellement impliqué et que l'événement a pu susciter des émotions fortes [Norris et Kaniasty 1992, Neisser 1996, Van Giezen *et al.* 2005]. Par conséquent, essayer de coupler la collecte de données comportementales sur un continuum de circonstances allant de la normale à l'extrême est en soi un défi, car cela implique une différence de résolution lorsque l'on progresse le long de ce continuum. La deuxième difficulté est liée à la complexité et à la multiplicité des situations auxquelles sont confrontées les personnes lors d'une inondation. Divers facteurs personnels et contingents et leurs interactions déterminent la réaction comportementale, d'où la difficulté de déterminer l'influence de chaque facteur séparément.

Un échantillonnage en "boule de neige" a permis, à partir des premiers témoignages, d'identifier et d'interroger, dans la mesure du possible, toutes les personnes ayant fait partie de l'histoire de ces premiers témoins. Cette technique d'échantillonnage vise à reconstituer, par croisement de témoignages, le détail des scènes de prise de décisions et d'actions en un lieu au fur et à mesure de l'évolution des circonstances. A l'image des enquêtes policières, c'est également un moyen d'établir les faits en limitant les biais mémoriels (inconsistance ou imprécision).

La constitution de la grille d'entretien s'est en partie inspirée des méthodes utilisées pour les études de mobilités telles que les enquêtes ménages déplacements qui cherchent à reconstituer l'ensemble des déplacements (origine, destination, motif, mode, heures de départ et d'arrivée...) d'un individu sur une journée et les travaux s'intéressant aux décisions de re-programmation des activités quotidiennes [Doherty et Miller 2000, Roorda *et al.* 2005, Clark et Doherty 2010]. Ces études combinent souvent di-

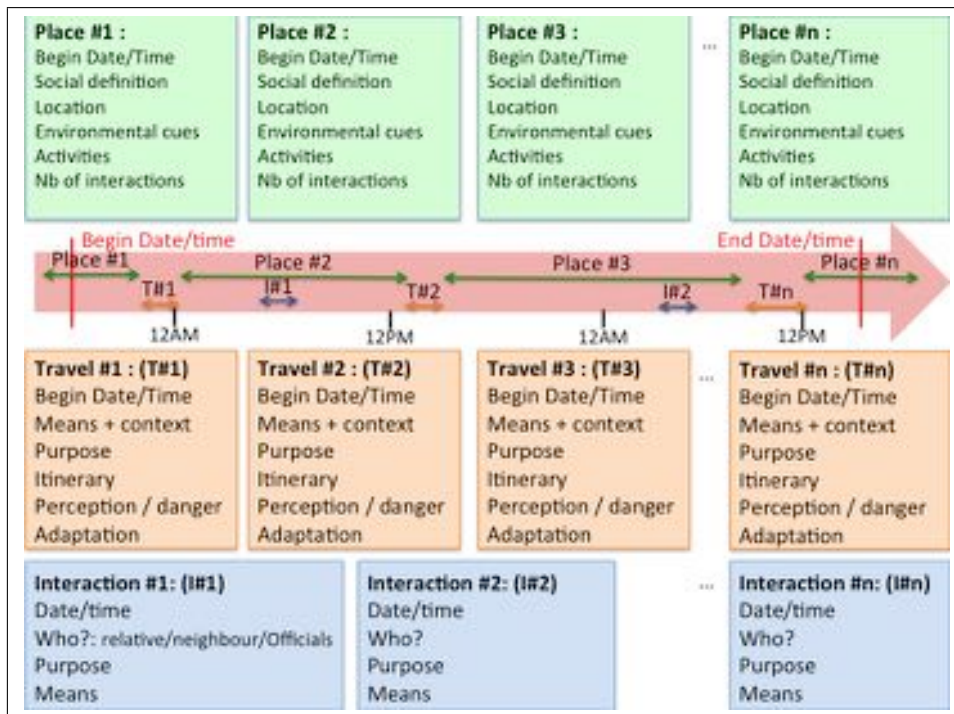


FIGURE 3.3 — Grille d’entretiens semi-directifs utilisée pour collecter les témoignages post-crués [Ruin *et al.* 2014].

verses méthodes d’enquête sous forme de questionnaires, du remplissage d’emplois du temps journaliers, d’entretiens semi-directifs et de suivi GPS afin de “*capture both routine and complex scheduling processes as well as observe those scheduling decisions made during the actual execution of the schedule*” [Doherty et Miller 2000].

La grille d’entretiens utilisée permet de guider le récit de manière chronologique, le faisant débiter aux moments où les témoins ont perçu les premières circonstances inhabituelles et terminer lorsqu’ils se considèrent sortis de la période de crise (nous ne considérons pas la période de remise en état). Chaque “scène”, constituant une unité de lieu, de temps et d’activité, est localisée dans l’espace (éventuellement à l’aide d’une carte/plan de ville qui permet ensuite sa géolocalisation) et dans le temps par une indication des horaires de début et de fin (Figure 3.3). Les déplacements sont considérés de la même manière avec des horaires de départ et d’arrivée et, si possible, la description d’un itinéraire associé. Nous avons également cherché à associer ces lieux à leur dimension symbolique (ce que ce lieu représente pour la personne) en le catégorisant lors du post-traitement des données. Nous faisons ainsi l’hypothèse que les décisions en situation d’urgence vont en partie dépendre des contraintes et représentations auxquels les différents types de lieux sont associées, notamment du lien affectif et de l’attachement que ceux-ci peuvent susciter. Par exemple, la voiture,

au même titre que la maison (dans le sens du chez soi) procurent généralement un sentiment de bien-être et de sécurité qui peut parfois être trompeur dans le cas de crues rapides [Dubois et Moch 2006, **Ruin et al.** 2007]. Enfin, pour chacune de ces "scènes", nous invitons chaque témoin à s'exprimer sur ce qu'il faisait, ce qu'il a perçu de son environnement proche et des interactions qu'il a eu avec d'autres personnes, qu'elles soient en présence ou à distance, et des éventuelles émotions que ces circonstances ont suscitées.

Sur la base des verbatims ainsi collectés, l'étape suivante consiste à coder les informations, en les regroupant par types d'activités, dans l'objectif de produire des séquences individuelles d'activités, dénommées "actogrammes" par André-Poyaud *et al.* [2006]. Ce mode de représentation à l'avantage de permettre aussi bien une comparaison inter-individuelle des réponses à la crise, qu'un examen de leurs temporalités au regard de l'évolution des circonstances environnementales issues de l'observation. Sur la base de nos hypothèses de départ et afin de bien différencier les activités "normales" des activités liées à l'événement, celles-ci sont classées en 7 catégories allant des activités routinières sans rapport avec l'événement, aux activités allant graduellement vers une prise en compte de plus en plus importante de celui-ci. Les activités de déplacements constituent également une catégorie du fait de leur forte vulnérabilité en situation de crue rapide (Figure 3.4). Le même travail de classification a été réalisé pour le type de lieux fréquentés, les émotions ressenties, les signes environnementaux perçus et les communications inter-personnelles.

3.1.2 Des verbatims aux "actogrammes" décrivant les réponses sociales

La représentation en actogrammes des différentes informations collectées lors des entretiens permet de constater la grande variabilité inter-individuelle aussi bien du point de vue de la succession des activités que de leurs temporalités ; certains passent par toutes les phases IOP quand d'autres sautent directement d'une activité routinière à la mise en protection. Le début de la prise de conscience (activité d'information de couleur verte) et le laps de temps qui sépare le début de l'information de la mise en protection diffère également grandement d'un individu à l'autre (Figure 3.4).

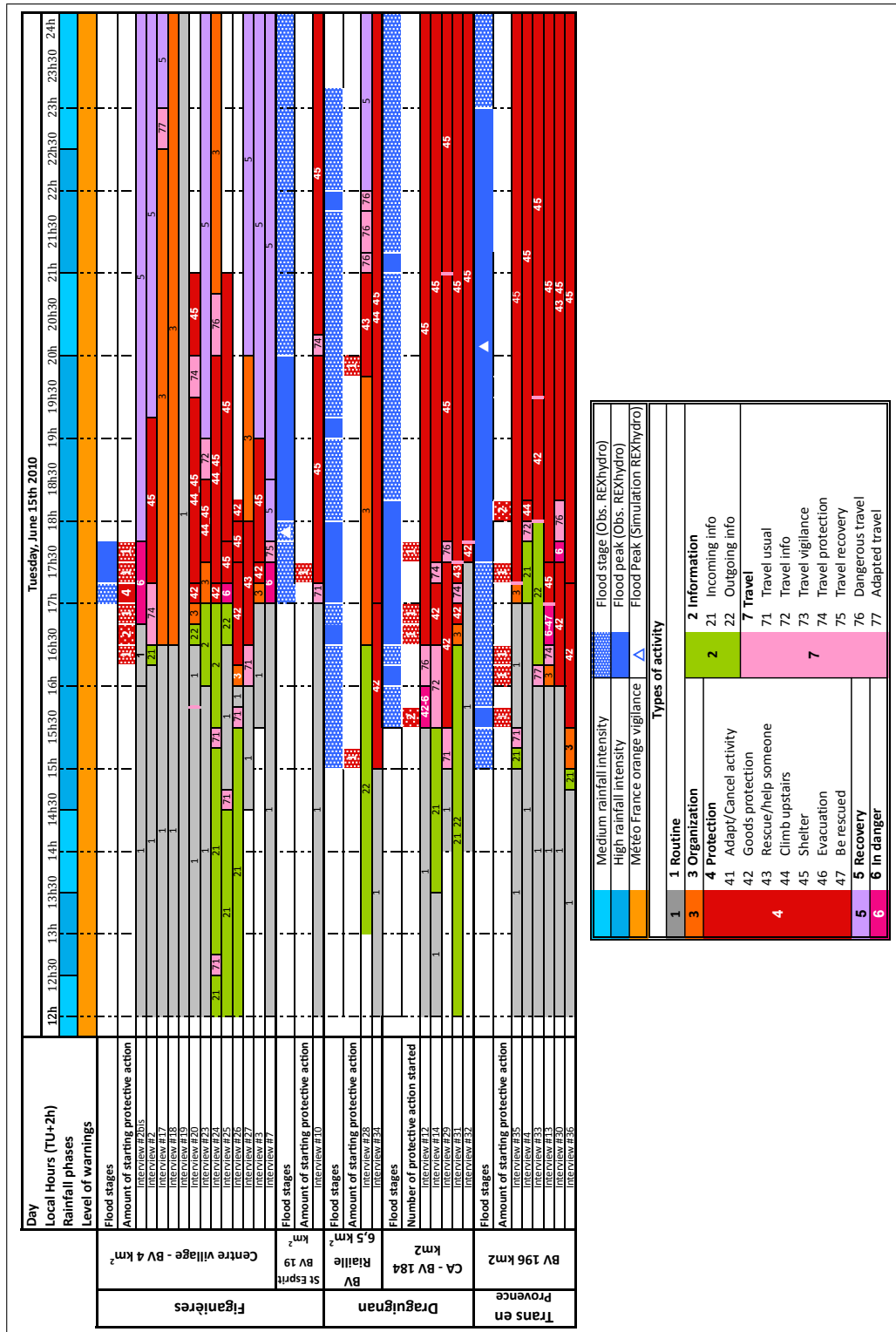


FIGURE 3.4 — Présentation sous forme d’actogramme de la succession des activités conduites, lors des crues du 15 juin 2010 dans le secteur de Draguignan (Var), par les personnes interrogées dans le cadre de la campagne de retour d’expérience. Figurent également la chronologie des pluies (selon 2 gammes d’intensité estimée à partir de données de ré-analyse de l’Observatoire Hydro-Météorologique Cévennes-Vivarais (OHMCV), le niveau de vigilance pluie-inondation de Météo-France et la chronologie des pics de crue (estimée à partir d’observations issues du retour d’expérience hydrologique) [Ruin et al. 2014].

3.2 Les réponses sociales au prisme des dynamiques hydro-météorologiques

3.2.1 Dynamiques des réponses sociales

Pour analyser plus avant le lien entre circonstances environnementales, perception de celles-ci, communications inter-personnelles, émotions et réponses comportementales engendrées, nous avons comparé la chronologie des intensités de pluie et des pics de crue avec les différentes modalités de variables déduites des entretiens. Sur la base des 29 témoignages exploitables collectés après les crues du 15 juin 2010 dans le secteur de Draguignan (Var) dans deux bassins de tailles significativement différentes (la Riaille et la Tuillière à Figanière et à Saint Esprit <20 km² et la Nartuby à Draguignan et à Trans-en-Provence env. 200 km²), nous avons ainsi catégorisé et représenté sous forme de courbes d'évolutions temporelles (Figure 3.5) :

- les activités de l'ordre de la "routine", "l'information" (recevoir ou émettre une information), "l'organisation", la "protection" (des biens et des personnes), la "récupération" (Fig. 3.5a). Une activité "en danger" a été créée pour comptabiliser l'évolution du nombre de personnes que se sont retrouvées, selon l'interprétation du chercheur, dans une situation dangereuse ;
- les signaux inhabituels perçus : "naturels" (vague d'eau, pluie, l'eau qui rentre...), "humains" (opérations de sauvetages, réactions des gens...) et "matériels" (dégâts matériels, voitures qui flottent, portes qui explosent...) (Fig. 3.5b) ;
- le ressenti des émotions selon 3 niveaux "rien" (aucun danger perçu et aucune émotion particulière ressentie), "inquiétude" et "peur" (Fig. 3.5b) ;
- les interactions sociales selon la qualité de l'interlocuteur "Famille", "Institutionnel" (sources d'information officielle...), "Autre" (amis, voisins, clients, collègues) ou selon la connaissance préalable ou non des interlocuteurs ; et le mode de communication adopté : "direct" et "indirect" (appel téléphonique, radio, sms) (Fig. 3.5c).

Sur l'ensemble des témoignages, nous pouvons observer la succession des phases d'information-Organisation-Protection (I-O-P) qui marquent la transition entre quotidien et réponse à la crise (Figure 3.6) :

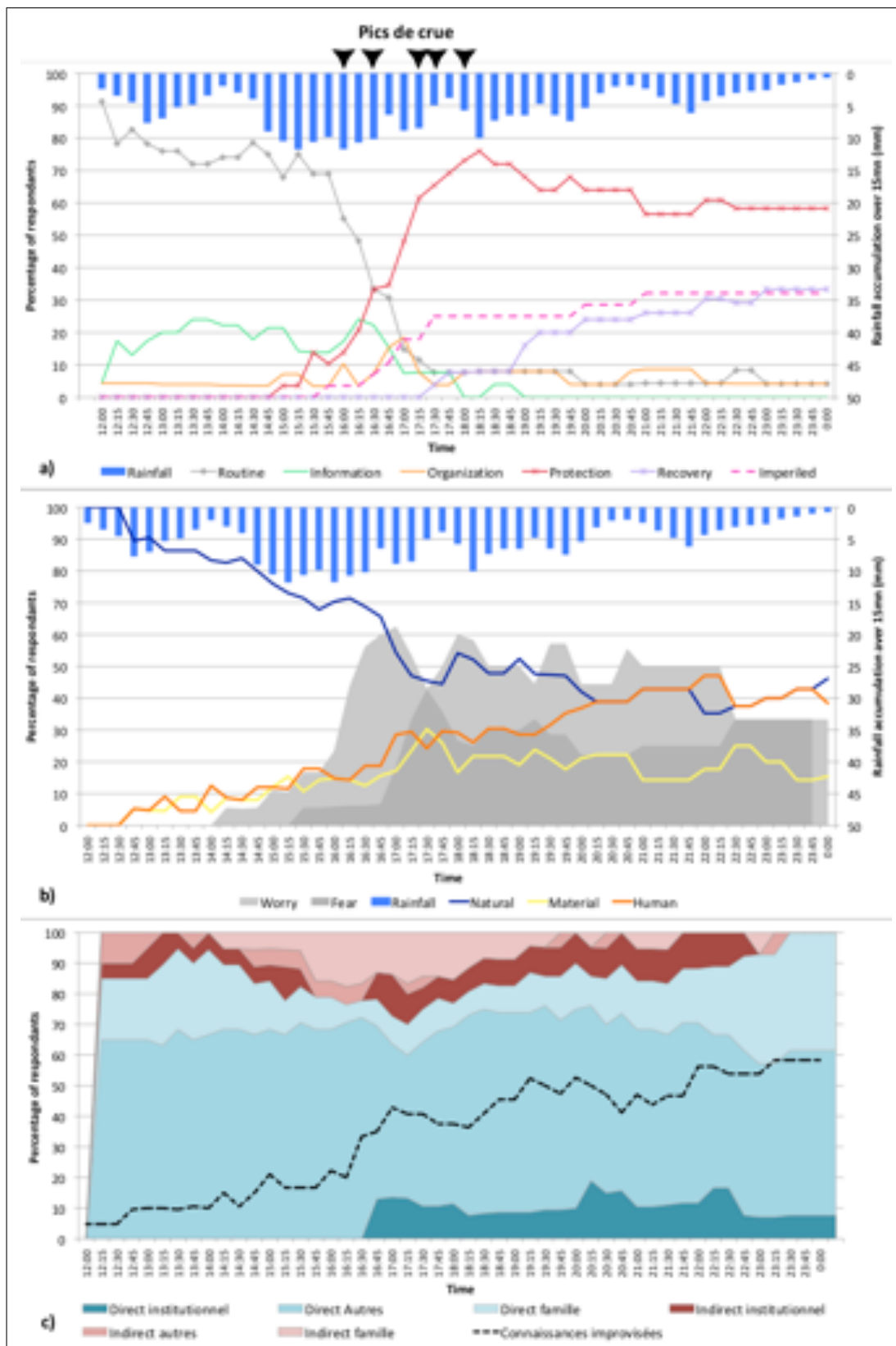


FIGURE 3.5 — Evolution sur la journée du 15 juin 2010 du pourcentage de répondants selon a) le type d'activités réalisées, b) les signes environnementaux perçus et les émotions ressenties, c) la nature des communications directes et indirectes mises en œuvre. Pour comparaison, figurent également les mesures d'intensité de pluie et les heures des pics de crues.

| | 12h | 13h | 14h | 15h | 16h | 17h | 18h | 19h | 20h | 21h | 22h | 23h | |
|-----------------------|---|-----|--|--|--|---|-----|--------------------------------------|---|----------------------------|-----|-----|--|
| Phases | Information | | | Organisation | | Protection | | Remise en état | | | | | |
| Activités | Routine 75% Information 19% | | | Organisation 7% Déplacement 7% | | Protection 66% En danger 3% | | Protection 59% Remise en état 27% | | | | | |
| Lieux | Travail 68,3% Domicile 28,5% | | | Sur la route 8,5% Dehors 4,2% | | Chez voisins 20,9% Abri improvisé 9,6% Bât publics 6,4% | | Chez soi 45% Abri improvisé 11,3% | | | | | |
| Signes perçus | Naturels 90,7% | | | Naturels 71,4% Humains 15% Matériels 13,6% | | Naturels 41% Humains 34,2% Matériels 24,8% | | | | | | | |
| Interactions sociales | Directes_Autres 65,4% Indirectes_Responsables 6,4% | | Directes_Autres 68,9% Indirectes_Famille 9,9% | | Directes_Autres 58,2% Directes_Responsables 11,6% Indirectes_Responsables 9,6% | | | | Directes_Autres 52,6% Directes_Famille 37,5% | | | | |
| Ressentis | Rien de spécial 97,3% | | | Inquiétude 36,2% | | Inquiétude 50,6% Peur 27,8% | | | | Rien 40% Inquiétude 40% | | | |

FIGURE 3.6 — Délimitation des 4 phases et des principales observations associées. Source : Shabou [2013]

Routine-information : Malgré une vigilance météorologique “Orange” en place depuis la veille la très grande majorité des individus poursuivent leurs activités (en majorité sur leur lieu de travail) dans un mode de fonctionnement routinier. Un premier pic de pluie semble susciter des actions d’information qui sont souvent menées en marge de la poursuite du quotidien. Cette phase est marquée par des signes perçus en majorité d’origine naturelle, des interactions sociales majoritairement directes avec des personnes autres et des proches, sans ressenti d’inquiétude ou de peur.

Organisation : Le deuxième pic de pluie et les premiers pics de crues (avant 17h) sont associés à une augmentation du nombre d’actions d’organisation/information (pas toujours facilement discernables les unes des l’autres) et une augmentation des activités de déplacement. Les signes “humains” et “matériels” sont de plus en plus perçus, les communications indirectes avec la famille sont à leur maximum et l’inquiétude croît sensiblement.

Protection : La phase de protection, clairement marquée par une forte augmentation du nombre de personnes adoptant des actions de protection, coïncide avec l’occurrence des pics de crue. Pendant cette phase, le nombre de personnes se retrouvant dans des lieux inhabituels (en extérieur, chez des proches/voisins ou dans des abris improvisés) est plus important, et le nombre de personne en situation de danger augmente également. Les signes “humains” et “matériels” sont plus fortement perçus, les communications directes et indirectes avec les responsables institutionnels prennent de l’ampleur

de même que les interactions avec des connaissances improvisées, le sentiment de peur augmente fortement.

Cette interprétation des résultats du retour d'expérience de l'événement du 15 juin dans le Var est à la fois informative et trompeuse. D'une part, il est intéressant de constater qu'à l'échelle réduite de cet événement localisé, il est possible de visualiser à l'échelle de l'individu ou de l'ensemble des personnes interrogées des séquences d'actions impliquant une transition plus ou moins progressive entre routine et protection, passant successivement par une phase d'information et d'organisation avant la mise en protection. Cette première observation va à l'encontre d'une vue assez technocratique, notamment formalisée par Carsell *et al.* [2004], qui assume que les actions d'Information et d'Organisation sont mises en oeuvre par les Institutions (e.g. prévisionnistes et gestionnaires de crise) tandis que les populations sont seulement supposées réagir aux alertes réalisées à l'échelle institutionnelle.

D'autre part, cette transition qui semble assez linéaire est sans doute moins univoque qu'elle n'y paraît. Une première raison est liée à la simplification du mode de représentation des données. En effet, dans le codage des actions, j'ai considéré l'activité prédominante par pas de temps (15mn) même si bien souvent les individus combinent une action principale avec d'autres types d'actions plus secondaires. L'action que nous avons considérée comme prédominante est celle qui reflète leur objectif prioritaire du moment et qui donc prend la majorité de leur temps. Je peux citer par exemple le cas du répondant #25 dont l'activité a été classée en "information" entre 16h30 et 17h alors qu'à cette période son action de communication avec les autorités locales (pour leur signaler un problème de ruissellement) était interrompue par des micro-tâches telles que disposer des serpillères au pied de la porte (de l'ordre de la protection des biens) pour éviter que l'eau rentre à l'intérieur ou même continuer à s'occuper de sa cliente (action de l'ordre de la routine). La seconde raison qui peut expliquer l'apparente linéarité des réponses sociales tient au fait que nous n'examinons ici que des bassins géographiquement proches dont les temps de réaction restent dans une gamme d'échelles comparables (4 à 200 km²), c'est à dire des bassins à réaction rapide, dont les pics de crues s'étalent sur seulement 2h de temps.

Néanmoins, dans le détail des réponses individuelles, il est intéressant de constater que tout le monde ne met pas la même quantité de temps pour effectuer cette succession de phases (I-O-P) (Figure 3.4). La perception du début de la perturbation ou de sa durée varie d'une personne à l'autre, non seulement parce que l'intensité du ruissellement peut effectivement varier considérablement à quelques centaines de mètres

de distance, mais aussi en raison du niveau de sensibilisation de chaque personne aux indices environnementaux liés à ses propres représentations mentales et aux priorités ou projets personnels du moment.

Lorsqu'il s'agit d'histoires interdépendantes où les gens sont co-localisés, on peut aisément faire l'hypothèse que les personnes ont subi les mêmes circonstances hydrologiques ce qui facilite l'inter-comparaison des réponses comportementales. Cette tentative de comparaison des comportements selon le lieu et donc les circonstances environnementales dans lesquels ils prennent place est illustrée par la figure 3.4 qui présente la chronologie des réponses individuelles rangées par bassin versant où se situaient les personnes au moment de la crise. Ce regroupement selon deux gammes de tailles de bassin ($<20 \text{ km}^2$ et environ 200 km^2) montrent une certaine coïncidence entre les réactions humaines, et en particulier les actions de protection (en rouge), et les heures des pics de crues (représentées par la couleur bleu roi) dans les différents bassins versants (Figure 3.4).

Lorsqu'il s'agit de savoir si les temps de réponses sociales varient selon les temps de réponses des bassins versants, il est nécessaire de comparer les témoignages au regard des échelles spatiales et des dynamiques des bassins versants considérés. Le choix d'une référence et d'une échelle temporelle commune relative aux circonstances d'inondation spécifiquement vécues permet de comparer les perceptions et comportements individuels au regard de la variété des circonstances environnementales. C'est à cet exercice de recalage temporel et de mise à l'échelle que je consacre la section suivante.

3.2.2 Une mesure de l'adaptation aux circonstances : les concepts d'anticipation et de "timeliness"

Les concepts d'anticipation et de "timeliness" que nous avons imparfaitement traduit par rythmicité permettent d'envisager les effets des dynamiques physiques sur les réponses comportementales des personnes exposées [Lutoff *et al.* 2018, Ruin *et al.* 2017]. Ces concepts reposent sur trois hypothèses [Lutoff *et al.* 2018] : i) le temps d'anticipation est une mesure de la durée qui sépare le début d'une action entreprise par un individu de l'heure du pic de crue, considérée comme le moment où le danger est à son maximum dans le bassin versant considéré. Le pic de crue marque la fin du temps disponible pour anticiper ; ii) il est essentiel d'apprécier correctement le temps d'anticipation précédant le pic de danger pour comprendre le temps disponible pour se

préparer à la crue. On comprend aisément qu’entreprendre une action de mise en protection ne se fait pas dans les mêmes conditions selon qu’elle est menée avant ou après le pic de danger ; iii) ce temps chronologique doit être relativisé par rapport au rythme de montée des eaux spécifique au bassin versant sur lequel l’action se déroule. Ainsi la durée d’anticipation d’une action n’a pas une signification absolue, mais elle doit être relativisée par rapport à la durée réellement disponible pour l’action, c’est-à-dire la durée (temps de réponse) séparant le pic de pluie du pic de crue du bassin versant considéré.

Cette approche est nouvelle en ce sens qu’elle ne mesure pas simplement le comportement en tant que variable dichotomique indépendante (a agi ou n’a pas agi), mais lie plutôt des comportements spécifiques à une évolution du danger dans l’espace et le temps. Cela permet d’analyser les types de comportement non pas de manière isolée, mais en fonction de la nature de la menace physique qui était réellement présente. Cette vision relativiste permet de regrouper ou de classer les types de couple comportements-menaces en variables dépendantes dérivées. Ainsi en plus de mesurer un temps d’anticipation ou une durée de mise en protection (durée de la séquence IOP) individuelle, il s’agit également d’envisager sa pertinence au regard du temps physiquement disponible pour l’action (soit le temps de propagation de la menace). Cette méthode favorise en quelque sorte une évaluation “objectivée” de l’adaptation des comportements aux circonstances, répondant ainsi à la question de la capacité de différents individus, communautés ou institutions à répondre au tempo imposé par les réponses hydrologiques. Elle permet une comparaison et une classification des types de réponses comportementales observées lors d’événements de crues indépendants, se déroulant dans des régions du monde et des périodes bien distinctes.

L’objectif d’apprendre d’événements distincts aux dynamiques hydrologiques variées, nous a conduit à réanalyser des données comportementales collectées dans des bassins versants allant de 4 km² à près de 2000 km² à la suite de crues passées, en 2002 dans le bassin du Gard [**Ruin et Lutoff 2004, Creutin *et al.* 2009**], en 2003 dans le bassin de la rivière Fella (Italie) [Borga *et al.* 2007], et en 2010 dans le bassin de la Nartuby (Var) [**Ruin *et al.* 2014**].

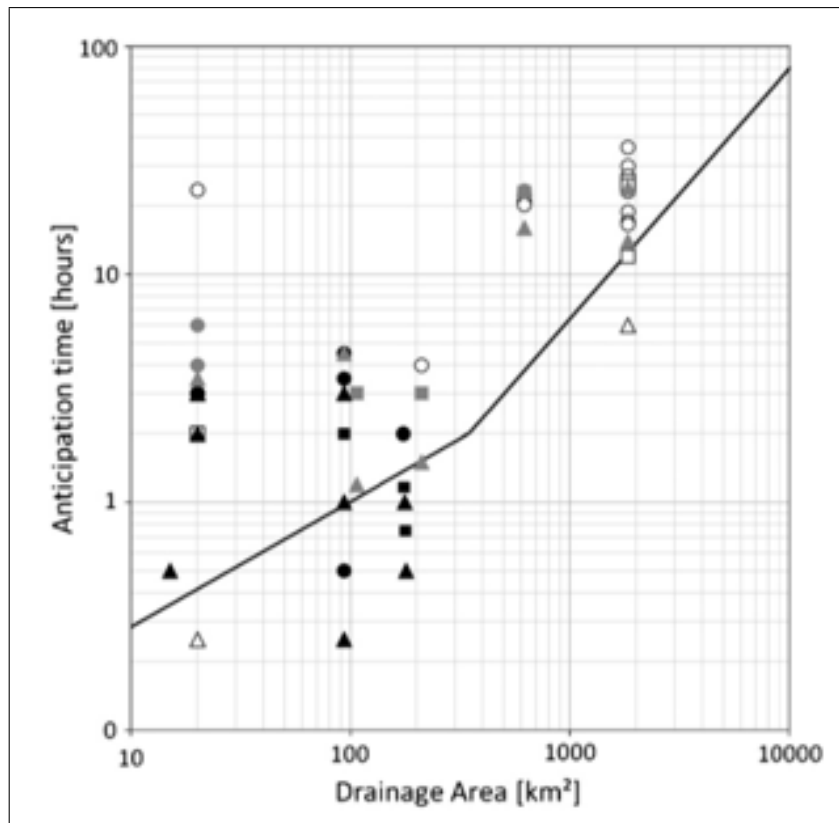


FIGURE 3.7 — Représentation logarithmique des temps d'anticipation (durée séparant l'action du pic de crue) de 57 types d'actions selon la surface du bassin versant où elles ont pris place. Les actions sont classées selon la nature de la réponse représentée par la forme des points : Information (cercle), Organisation (carré), Protection (triangle) et la nature des groupes humains à l'origine de l'action représentée par la couleur du point : Institution (blanc), Communauté (gris), Individus (noir). La relation entre la surface du bassin versant et son temps de réponse est représentée par une droite montrant un point d'inflexion situé autour de la surface de 350 km². Source : **Creutin et al. [2013]**.

Les crues sont elles mieux anticipées dans des bassins à dynamique lente que dans ceux à dynamiques rapides ?

Nous nous sommes d'abord attachés à examiner les réponses sociales en représentant les temps d'anticipation des différentes actions (Information, Organisation, Protection) et des types d'entités sociales qui les conduisent (Individu, Communauté, Institution) selon la taille du bassin versant où se déroule l'action (Figure 3.7). La classe 'Individu' regroupe les réactions de personnes seules ou des membres d'un même foyer. Sont considérés comme "Communauté" les groupes rassemblant plusieurs personnes situées au même endroit au même moment dont les liens sont plus distendus (voisins, associations, membres d'une même entreprise, échelon communal...). La catégorie "Institution" implique des acteurs publics, représentants d'administrations ou de services oeuvrant à l'échelle plus collective (Département, service de météorologie

Nationale, SDIS, préfecture...). Sont ainsi représentées 57 actions réparties sur 8 bassins versants. Les principales conclusions que nous avons tiré de cette comparaison inter-bassins versants des temps d'anticipation des différents types de réponses mises en oeuvre par différents types de regroupements humains sont les suivantes :

- Les trois types d'activités I-O-P sont observés pour les trois groupes humains représentant des niveaux croissants d'agglomération de personnes.
- Il apparaît que le temps d'anticipation associé à la dernière action de protection menée avant le pic de crue dans chacun des bassins versants augmente avec la surface du bassin versant, ce qui indique une meilleure capacité d'anticipation dans les bassins les plus grands ;
- Il est également intéressant de considérer le lien entre la distribution des temps d'anticipation au regard des temps de réponse des bassins versants (représentés par la droite). Toutes les chaînes d'actions documentées débutent avant la montée des eaux (points situés au dessus de la droite) alors que seuls les précurseurs météorologiques (précipitations) sont perceptibles. Les actions se terminent entre le début de la montée des eaux et les pics de crues (points situés au dessous de la droite). Ces actions sont, sauf exception, des actions d'organisation et de protection. Cette constatation tend à montrer que l'anticipation et la nature des réponses humaines s'adaptent au rythme imposé par le phénomène physique contrôlé par la taille des bassins versants ;
- Si l'on considère les réponses dans des bassins versants inférieurs à 100 km², il apparaît que de nombreuses actions d'organisation et de protection soient mises en oeuvre juste avant le pic de crue et en majorité avec un temps d'anticipation inférieur au temps de réponse du bassin versant considéré. D'après les témoignages, ces réponses proches du réflexe de survie sont plutôt déclenchées par une réponse émotionnelle associée à la perception directe de l'irruption des eaux plutôt qu'à la réception d'informations venant de l'extérieur ;
- Les temps de réaction caractéristiques des différents types de groupes humains diminuent avec la taille du groupe. Ainsi, les institutions anticipent dans les 36h à 30h, les communautés entre 23h et 6h avant le pic de crue alors que les réactions de petits groupes d'individus n'interviennent que dans les quelques heures qui précèdent le pic ;
- La taille des bassins versants semble être associée à la taille des groupes humains. Les actions institutionnelles étant principalement menées dans les bassins les plus

grands (Gard, Vidourle) alors que les réponses des communautés et individus sont plus nombreuses dans les plus petits bassins. Néanmoins il faut noter que les actions des individus et des communautés sont sous-représentées sur les grands bassins de notre échantillon. Ainsi, il semble que la réponse rapide des très petits bassins versants soit peu compatible avec les temps de réponse des institutions, ce qui oblige les communautés et individus à se mettre en protection par eux-même ;

- Les différents types de groupes humains considérés disposent de différentes capacités pour anticiper les crues selon la nature de l'information à laquelle ils ont accès. A l'échelle institutionnelle comme à l'échelle des communautés et individus, l'information ou la vigilance météo et hydrologique est disponible à des échelles spatiales assez grandes qui ne sont pas suffisantes pour caractériser précisément la nature des problèmes locaux auxquels faire face. Ainsi localement les individus et communautés ne réagissent pas immédiatement aux informations de grande échelle mais font appels à d'autres sources non officielles, comme l'avait déjà montré Parker et Handmer [1998], et à leurs propres observations environnementales.

Le tempo des réponses sociales est-il adapté au temps disponible pour l'action ?

Notre second angle d'analyse appelé "timeliness" tente de mesurer l'adéquation entre le tempo de mise en oeuvre des réponses humaines et celui caractérisant la réponse des bassins versants aux précipitations. Ainsi, il s'agit de considérer non plus une mesure absolue du temps d'anticipation d'une action humaine mais de relativiser cette mesure au temps physiquement disponible pour l'action en faisant le ratio de ces deux quantités de temps. Ainsi nous considérons le temps de réponse caractéristique à chaque surface de bassin versant comme l'unité de temps disponible pour anticiper le pic de danger que représente le pic de crue. Ce type de raisonnement a permis d'examiner la distribution des mesures de "timeliness" pour 164 actions d'Information, Organisation, Protection mises en oeuvre à l'occasion des crues de 2002 (Gard), 2003 (Italy), 2010 (Var) **Lutoff et al. [2016]**. Il permet également de situer temporellement ces actions par rapport aux 3 phases distinctes du phénomène hydro-météorologique qui sont dominées par :

- des précurseurs climatologiques qui ne peuvent être détectés que par des modèles de prévision météorologique et hydrologique, ou par des observateurs éclairés

ayant développés leurs propres systèmes de détection (issus ou non d'un savoir vernaculaire) ;

- des précurseurs météorologiques séparant le début des précipitations du début de la montée des eaux (le signal naturel le plus prégnant étant celui des pluies) ;
- des précurseurs hydrologiques initiant la période montée des eaux qui devient le facteur prédominant.

La délimitation des seuils théoriques part du principe que les précurseurs hydrologiques sont présents dès le début de la montée des eaux, c'est à dire pour une valeur de *timeliness* égale ou inférieure à 1 ou 100% du temps de réponse des bassins (Figure 3.8). La période des précurseurs météorologiques précède cette phase pour des valeurs de "timeliness" comprises entre 260% et 100%, [Creutin *et al.* 2013] ayant montré que le temps qui sépare le début de la pluie du pic de crue équivaut à 2,6 fois celui du temps de montée des eaux quelque soit la surface du bassin versant. Pour des valeurs de "timeliness" supérieures, les actions humaines sont dans le domaine des précurseurs climatiques où les signes environnementaux ne sont pas directement perceptibles.

Sur la base de notre échantillon, 48% des 164 actions documentées sont conduites dans des bassins versants réagissant en moins d'une heure, 43% sont localisées dans des bassins moyens réagissant en plus d'une heure mais moins de 10h et seulement 9% concernent des grands bassins plus lents ayant des temps de réponse supérieurs à 10h (et jusqu'à 48h). La plus grande proportion d'actions (46%) est réalisée pendant la période des précurseurs climatologiques. C'est ensuite, la période des précurseurs hydrologiques qui rassemble le plus d'actions (41%), celle des précurseurs météorologiques en rassemble peu (13%).

De façon contre-intuitive, la figure 3.8 semble révéler une anticipation des actions humaines plus en adéquation avec les temps de réponses hydrologiques dans les bassins versants les plus rapides. Ceci semble indiquer que, dans le cas des grands bassins versants, ce n'est pas parce que les individus et les groupes exposés disposent de beaucoup de temps pour réagir qu'ils utilisent la totalité du temps disponible pour anticiper leur mise en protection. Inversement dans les bassins à dynamique très rapide, il semble que les individus et les groupes humains perçoivent la nécessité d'anticiper leurs actions avant l'occurrence des précurseurs hydrologiques car la mise en oeuvre de leurs réponses nécessite plus de temps que le temps de réponse hydrologique. En termes de tendance, il semble que les actions d'information sont en moyenne plus anticipées que les actions d'organisation et de protection, les premières intervenant pendant la

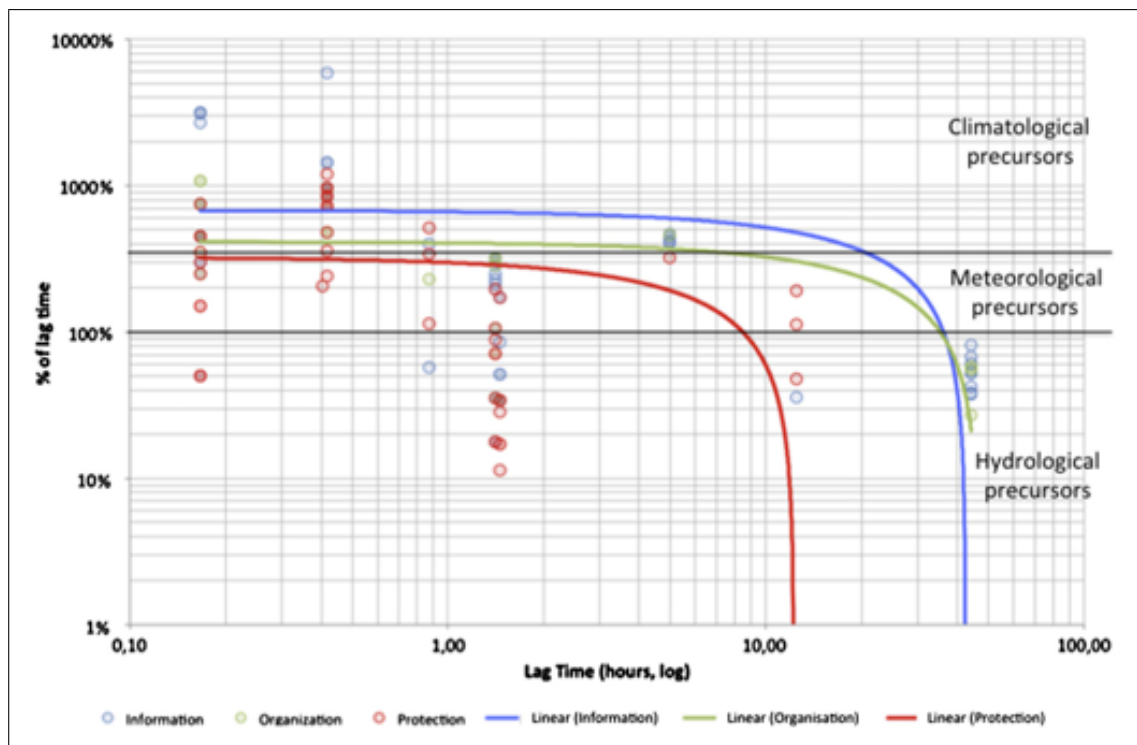


FIGURE 3.8 — Distribution de la variable “timeliness” des activités IOP selon le temps de réponse des bassins versants où se situe l’action. L’axe des abscisses représente les temps de réponse théoriques calculés sur la base de la relation empirique surface-temps de réponse proposée par **Creutin *et al.* [2013]**. L’axe des ordonnées donne la valeur (en pourcentage) du ratio entre temps d’anticipation d’une action et temps de réponse du bassin versant. Cette valeur informe sur la part du temps disponible réellement utilisée pour anticiper le pic de crue. L’échantillon des activités IOP considérées est issu de données collectées par entretiens semi-directifs suite à 3 événements de crues rapides : Gard (France, 2002), Malborghetto-Valbruna (Italy, 2003) et Var (France, 2010) (N = 164). Source : **Lutoff *et al.* [2016]**.

phase des précurseurs climatologiques alors que les deux autres commencent souvent à partir des précurseurs météorologiques.

Si l’on s’intéresse aux types de groupes humains et aux actions réalisées selon la phase, les institutions agissent plutôt dans le domaine de l’information pendant les phases de précurseurs climatiques (35%) et hydrologiques (27%) et contrairement à ce que l’on pourrait imaginer les individus s’informent et se protègent aussi bien pendant les phases climatologiques qu’hydrologiques. Pour l’échelon intermédiaire de la communauté, la phase des précurseurs climatologique conduit plutôt à des actions d’information (29%) et la phase hydrologique à des actions de protection (18%). On peut ainsi conclure de ces observations que les précurseurs météorologiques sont peu enclins à susciter des réactions quelque soit le type de groupe humain.

3.2.3 Bénéfices et limites d'une approche couplée des processus socio-hydro-météorologiques

Cette approche couplée s'avère particulièrement intéressante pour étudier les actions individuelles et collectives en lien avec l'évolution des conditions de crise hydro-météorologique. Elle nécessite néanmoins d'avoir accès à des données (géo)lo-calisées et horodatables dont la collecte en masse n'est pas évidente pour plusieurs raisons.

D'abord l'organisation et la réalisation de missions de retour d'expérience post-crise sur le terrain nécessite des financements pérennes et des ressources humaines mobilisables suffisamment facilement pour être réactifs suite à l'occurrence d'événements de crues rapides. Entre 2010 et 2020, j'ai eu la chance de bénéficier de conditions financières et d'un cadre de projet favorable grâce au programme HyMeX¹. Mais il est clair que ce type de projet sur 10 ans reste exceptionnel et deviendra probablement de plus en plus rare avec la raréfaction des crédits de recherche.

Ensuite selon la sévérité et l'émotion suscitée par l'événement, la mémorisation des circonstances par les protagonistes peut être plus ou moins entachée de biais [Norris et Kaniasty 1992, Neisser 1996, Van Giezen *et al.* 2005]. Ainsi, comme j'ai pu le constater lors de l'épisode de crues de septembre 2005 dans le Gard, les moments forts en émotions restent plus vivaces. Lors de cet épisode distribué en deux phases de crises distinctes séparées par une accalmie en milieu de semaine, il est apparu clairement au travers de nos entretiens que les personnes interrogées étaient incapables de se rappeler précisément ce qu'elles avaient fait pendant l'accalmie alors qu'elles pouvaient détailler à la minute près leurs actions et leurs perceptions au plus fort de la crise. Cette observation est relativement forte de conséquence dans le sens où le simple fait de se rappeler les circonstances avec précision pourrait permettre de déterminer le moment où les individus sont sortis d'un fonctionnement "automatique" associé à des pratiques habituelles pour aller vers un fonctionnement "raisonné" intégrant une forme d'activation de la vigilance aux circonstances inhabituelles et potentiellement dangereuses.

Cette capacité à mieux se rappeler les moments intenses en émotions amène à penser qu'il est plus facile de documenter les événements à forts impacts sociétaux et que les personnes qui acceptent de nous accorder un entretien sont généralement des per-

¹HYdrological cycle in the Mediterranean EXperiment : Le programme HyMeX vise à une meilleure compréhension, quantification et modélisation du cycle hydrologique en Méditerranée, en mettant l'accent sur la prévisibilité et l'évolution des événements météorologiques extrêmes, la variabilité interannuelle à décennale du système couplé méditerranéen et les tendances associées dans le contexte du changement global

sonnes marquées par l'événement qui ont le sentiment d'avoir vécu une expérience intéressante à partager. A l'inverse les événements moins exceptionnels qui pourraient nous renseigner sur des adaptations comportementales plus subtiles paraissent plus difficiles à documenter par des entretiens car il faudrait pouvoir les réaliser immédiatement après l'événement.

Pour palier ces inconvénients liés au mode d'enquête mais également pour essayer de mieux quantifier le lien entre circonstances hydro-météorologiques et réponses sociales à partir d'un plus grand nombre de témoignages, nous avons également eu recours aux enquêtes en ligne et à l'analyse de contenu de tweets géolocalisés [Cavalière *et al.* 2020, Musy 2016, Tournon 2015]*.

Ainsi, nous avons mis en place à l'automne 2014 une enquête en ligne permettant à chacun de témoigner de son expérience liée à l'occurrence d'un épisode de pluie-inondation. Si les entretiens réalisés sur le terrain après les crises permettent de collecter des jeux de données séquentielles couvrant la totalité de la période de crise, l'enquête en ligne se focalise sur un moment précis de l'événement, le moment perçu comme le plus intense. Le témoignage est ainsi géolocalisé par le biais de l'adresse à laquelle se situait le témoin à ce moment et horodaté par une question portant sur l'heure du plus fort de l'épisode. Suivent ensuite plusieurs questions sur la perception de la sévérité des pluies et des ruissellements, les dommages occasionnés, la perception du danger et les différents types d'adaptations comportementales mises en oeuvre pour y faire face.

Si la plupart de ces témoignages en ligne² documentent les événements qui viennent de se produire, certaines personnes rapportent également des événements plus anciens qui figurent parmi les plus marquants des dernières décennies (Nîmes 1988, Vaison la Romaine 1992, Gard 2002 et 2003, Var 2010). Bien évidemment la représentativité des réponses obtenues est limitée car elle est dépendante à la fois de notre capacité à diffuser largement le lien donnant accès à l'enquête et de la nature du support d'enquête (internet) qui met de côté une partie de la population.

Néanmoins, ce mode d'enquête a permis de réunir un nombre de réponses important (un total de 623 entre septembre 2014 et décembre 2015) sur la base d'une diffusion restreinte à quelques site web d'experts et observateurs des phénomènes météorologiques (société Meteo-villes et association InfoClimat par exemple), aux sites

²<http://goo.gl/forms/q80gfQbPNN>

internet de l’OHMCV³ et de l’Observatoire du Risque Inondation du Gard ⁴, à radio France Bleu Azur, et à nos propres réseaux de connaissances dans les départements du Sud de la France ayant fait l’objet d’une récente vigilance météorologique orange ou rouge. Dans le cadre du programme HyMeX, cette même enquête a été traduite et adaptée pour un public Grec et diffusée par nos partenaires de l’Observatoire National d’Athènes (NOA) ⁵ suite à l’épisode de crues rapides qui a affecté la région d’Attica en octobre 2015. Vu la grande popularité du site internet de la NOA, plus de 800 questionnaires valides ont été collectés en 5 jours. L’analyse des réponses permet d’établir un lien statistique entre les quantités de précipitation, le niveau de danger, les émotions perçues et le type de réponse comportementale (par exemple les catégories d’actions IOP décrites précédemment) [Papagiannaki *et al.* 2017, Ruin *et al.* 2019].

Le cadre d’analyse spatio-temporelle proposé comporte néanmoins certaines limites liées à ses hypothèses sous-jacentes. Le lien entre l’espace, le temps et les réponses montre des limites dans le cas des automobilistes. S’ils sont en situation de mobilité, il est difficile d’associer un itinéraire à une taille de bassin versant spécifique. Un itinéraire est souvent ponctué de plusieurs sections de route submersible avec des aires de drainage en amont parfois très variables [Debionne *et al.* 2016]. Ainsi les témoignages de personnes en situation de mobilité au moment de la crise peuvent être délicats à contextualiser d’un point de vue hydro-météorologique.

3.3 Synthèse et perspectives

Cette analyse croisée des aspects humains et physiques des événements de crues rapides s’avère mutuellement bénéfique pour les hydro-météorologues et les chercheurs intéressés par la dynamique des réponses humaines face au risque.

Apports pour la recherche sur les processus physiques

À l’origine nous avons appliqué ce type d’approche croisée à l’analyse des circonstances fatales [Ruin *et al.* 2008]. Ceci a permis de mettre en lumière aux yeux des hydro-météorologues et opérationnels le potentiel de dangerosité que représentaient les bassins versants de quelques kilomètres carrés dont la réaction est gouvernée par

³<https://ohmcv.osug.fr>

⁴<http://www.noe.gard.fr>

⁵<http://www.noa.gr/index.php?lang=en>

des pluies intenses produites par des cellules convectives de petite échelle. Cette focalisation sur les bassins de petites tailles a contribué à montrer l'intérêt des radars météorologiques pour l'observation des champs de pluie compatibles avec les échelles spatiales et temporelles caractéristiques des crues rapides et pour la mise en oeuvre de l'alerte à ces échelles [Creutin et Borga 2003, **Creutin et al. 2013**]. Ainsi, pour améliorer la prévision et l'alerte aux crues éclair, les météorologues ont déployé des efforts en termes de modélisation et d'assimilation des données d'observation notamment dans le but d'atteindre des résolutions spatiales horizontales kilométriques comme par exemple pour le modèle AROME de Météo-France [Brousseau et al. 2016].

Les hydrologues se sont également concentrés sur l'estimation des débits de pointe dans ces bassins non jaugés en développant de nouvelles méthodes de retour d'expérience combinant l'estimation des hauteurs d'eau par les laisses de crues et la collecte de témoignages et de vidéos d'amateurs pour reconstituer la temporalité du phénomène et les vitesses d'écoulement [Gaume et Borga 2008]. Ainsi, l'aspect humain de la question pousse les hydrologues à documenter et à comprendre plus précisément la limite inférieure des temps de réaction des bassins versants en fonction de l'échelle du bassin et à caractériser l'asynchronisme des pics de crue. La limite inférieure de réponse aux inondations semble être liée au temps de propagation dans le réseau hydrologique. L'asynchronicité est contrôlée par l'organisation atmosphérique de la convection et apparait comme la source de danger principale [**Creutin et al. 2009, 2013**]. En termes de modélisation, des développements méthodologiques ont également été conduits en matière de modélisation hydrologique régionale pour reproduire les chroniques de débits sur une large gamme de tailles de bassins, notamment pour les bassins meurtriers de moins de 20 km² [**Ruin et al. 2008, Vannier et al. 2016**].

Apports pour la recherche en sciences sociales sur les risques

L'analyse des circonstances hydro-météorologiques des décès lors des épisodes de crues rapides a mis le doigt sur un nouveau facteur de vulnérabilité humaine associé aux bassins à dynamique très rapide : le facteur comportemental et notamment la persistance et l'inadaptation des comportements de mobilité quotidienne en situation de crise.

Cette approche par les échelles spatio-temporelles du risque m'a amené à examiner l'enchaînement des actions humaines sous forme de séquences d'actions qui sont localisées à un endroit donné et à formaliser le caractère "opportun" de ces actions.

Cela a permis d'explorer le lien entre les circonstances hydro-météorologiques, les différents types de réponses qu'elles suscitent et les échelles d'agglomération sociales qui les mettent en oeuvre. Nous avons illustré comment des individus et des petits groupes de personnes émergent pendant les crises pour organiser leur propre protection locale "non officielle". Cet exercice contribue à remettre en question le cadre top-down classique de l'alerte "officielle" délivrée par les gestionnaires institutionnels du risque et qui s'applique plutôt à l'échelle régionale ou nationale.

Ces résultats préliminaires semblent également confirmer que les personnes exposées se comportent différemment en fonction des conditions locales auxquelles elles sont confrontées pendant les crues éclair. Le rythme des actions humaines s'adapte au contexte physique et semble s'accélérer à mesure que le danger approche, notamment du fait de l'augmentation des sentiments d'inquiétude et de peur. Cela signifie que, compte tenu du facteur d'échelle, nous pouvons comparer plus efficacement le comportement des individus en tenant compte de la dynamique des circonstances de crues auxquelles ils sont soumis.

Les implications de ces résultats pour l'adaptation des processus d'alerte aux échelles sociales en jeu sont considérables et vont de la communication de l'incertitude des prévisions hydro-météorologiques à la compréhension de l'influence des différentes sources et natures de l'information (des observations environnementales directes aux communications des réseaux sociaux) sur les processus décisionnels et l'adoption de mesures de protection en situation d'urgence. Ces connaissances constituent un premier pas nécessaire vers les analyses prédictives des systèmes couplés homme-nature intégrant les interactions entre les dynamiques de vulnérabilité sociale et celles des phénomènes [Borga *et al.* 2019].

Enfin, cette approche couplée nécessite la mise en place d'une nouvelle méthodologie de collecte de données comportementales permettant de situer les décisions individuelles et collectives dans le contexte d'un environnement physique extrêmement dynamique. Ainsi la grille d'entretien chronologique constituée pour répondre à ses objectifs permet de renseigner un grand nombre de paramètres caractérisant la succession des états de l'individu sur les plans perceptif, émotionnel, communicationnel, en même temps qu'il documente les scènes d'actions (actions situées) auxquels ses états sont associés. Créée pour répondre à nos questionnements sur le risque de crue rapide, cette méthodologie s'adapte facilement à l'étude d'autres types de risques naturels. Ainsi elle a été récemment utilisée et adaptée en termes de résolution temporelle de l'information collectée pour étudier les comportements de protection occasionnés

par l'occurrence de secousses sismiques [Bertran Rojo *et al.* 2017].

Perspectives

Ce type d'approche offre des perspectives à plus ou moins long termes. Celle de plus court terme poursuit la démarche initiée en appliquant cette analyse couplée à d'autres types de variables telles que les données sur les signaux (naturels, humains ou matériels) perçus, les interactions sociales et le niveau émotionnel, afin de relier ces moteurs de l'action aux précurseurs climato-météo-hydrologiques. Ensuite sur la base de l'ensemble des données comportementales collectées à l'occasion des retours d'expérience HyMeX, il serait intéressant de proposer une classification des comportements relativement au niveau de menace subi en tenant compte à la fois des paramètres d'anticipation et de *timeliness*. Cette nouvelle typologie de la variable couplée comportement-menace sur un grand nombre de cas pourra permettre de tester l'influence des paramètres socio-démographiques et des facteurs soient-ils d'ordres naturels (temps de réponse des bassins), communicationnels ou sociaux-cognitifs (signes perçus, émotions, contraintes organisationnelles) sur le type de réponse.

En généralisant ce mode de collecte et d'analyse de données à de nombreux cas de crues dans des contextes hydrologiques et socio-culturels distincts, il serait alors possible d'envisager une exploitation statistique, du type analyse de variance (ANOVA), pour faire le lien entre dissimilarité des séquences comportementales en réponse à une menace, et variables socio-démographiques et hydro-météorologiques⁶. Les résultats de ces analyses permettraient de nourrir des modèles de prédiction des réponses comportementales sur la base de variables représentatives des dynamiques et sociales gouvernant la transition entre pratiques routinières et mise en protection. Cet objectif de plus long terme pose la question de l'optimisation de la collecte de données comportementales qui, comme nous l'avons vu demande d'importantes ressources humaines. Aussi, des efforts supplémentaires pour poursuivre le développement du concept d'enquêtes post-événementielles et tirer le meilleur parti du potentiel des réseaux sociaux et des traces numériques géolocalisées me semble une piste intéressante.

Avec l'usage quasi-généralisé des technologies mobiles capables de géolocaliser et de partager en temps réel des informations de différentes natures (photographies, vidéos, itinéraires de déplacement, témoignages) via les réseaux sociaux, l'usage des

⁶je reviendrai sur ces méthodes utilisées et décrites dans la section 4.1 pour l'analyse des séquences d'activités-déplacements issues de l'Enquête Nationale Transport et Déplacement

sciences participatives et de l'information géographique volontaire (*Volunteered Geographic Information - VGI*) s'avèrent particulièrement prometteur. La production massive de données par des non-spécialistes a d'ores et déjà permis à la recherche scientifique de développer le suivi spatio-temporel de différents types de phénomènes qu'ils soient géophysiques, écologiques ou sociaux-culturels. Ainsi, le développement de réseaux de citoyens-capteurs (*citizen-as-sensor* selon l'expression de Goodchild [2007]) couplé aux capacités des réseaux d'observation instrumentés et aux potentialités d'analyse offertes par l'intelligence artificielle ouvre l'univers des possibles. Dans le domaine de l'analyse des crises et des catastrophes naturelles cela a permis le développement d'un nouveau domaine de recherche répondant au nom de *crisis informatics* [Palen *et al.* 2007].

Evidemment, la masse de données potentiellement disponible et la variabilité de la nature des contenus et de la crédibilité des sources posent question et nécessitent d'étudier la capacité des différentes plateformes de réseaux sociaux à fournir la donnée recherchée. Ainsi j'ai pu participer à une première expérimentation portant sur l'opportunité que représente les traces numériques géolocalisées disponibles via la plateforme Twitter pour apprendre des comportements mis en oeuvre pendant les crues rapides [Cavalière *et al.* 2020]. Il ressort de cette étude que l'utilisation de cet outil pour la recherche sur les comportements s'avère assez limité en termes de contenu et ne permet pas réellement de repérer des comportements types tels que ceux identifiés avec les entretiens post-inondation. Même s'il n'est pas non plus exempt d'écueils (par exemple la sur-représentation de quelques individus hyperactifs sur le réseau), ces traces numériques permettent néanmoins d'observer que l'évolution de la perception des circonstances environnementales et d'alerte (pluie, inondation, niveau de vigilance) communiqué par tweet reflète la distribution spatio-temporelle de ces mêmes circonstances.

L'usage des réseaux sociaux et des technologies mobiles a transformé en profondeur la façon dont les individus s'informent, partagent et utilisent l'information en créant de nouveaux réseaux de relations et d'information en temps de crise Palen *et al.* [2010], Fraustino *et al.* [2012]. Ainsi comme le montrent Morss *et al.* [2017], les réseaux sociaux peuvent constituer des ressources intéressantes pour comprendre la création, la communication, l'interprétation et l'utilisation de l'information portant sur les menaces météorologiques dangereuses et incertaines en tant que processus évolutifs et interconnectés. Au fur et à mesure que la complexité et l'utilisation de ces technologies ne cessent de croître, il est également crucial de comprendre leur impact et leur potentiel de modification du comportement, ainsi que d'identifier les pièges souvent non

identifiés dans leur analyse [Palen et Anderson 2016]. Ce type d'investigation nécessite de construire des questions de recherche interdisciplinaires articulant les sciences sociales, la géomatique et l'intelligence artificielle.

La prédiction des événements à forts impacts est-elle possible et utile ?

Les progrès technologiques en matière de prévision des crues soudaines ont largement amélioré les systèmes d'alerte au cours des dernières décennies. Pourtant, ces événements continuent à figurer parmi les risques météorologiques les plus mortels en Europe, aux États-Unis et dans le monde. Depuis quelques années, des modèles utilisant des produits à haute résolution spatio-temporelle ont été développés pour aider les prévisionnistes opérationnels à émettre des alertes aux crues soudaines [Braud *et al.* 2018, Gourley *et al.* 2016]. Cependant, ces progrès ne suffisent pas à prévoir l'apparition de situations dangereuses résultant de la conjonction de l'aléa et des vulnérabilités sociales et comportementales qui évoluent dans des gammes d'espace et de temps courts. La prise en compte des facteurs d'exposition et de vulnérabilité sociales est nécessaire pour mieux comprendre et anticiper les circonstances spécifiques qui conduisent aux impacts humains des crues soudaines.

Actuellement, les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sociale sont dominées par une approche cartographique basée sur la construction d'indices synthétiques qui additionnent les dépendances sociales et les désavantages économiques de la population à des échelles géographiques variées [Cutter *et al.* 2000, 2003]. Bien que de nombreuses recherches portent sur l'analyse des impacts d'inondations et la compréhension des causes sociales sous-jacentes [Ashley et Ashley 2008, Doocy *et al.* 2013], la prise en compte de la vulnérabilité dynamique reste rare [Terti *et al.* 2015]. Fortement influencée par des études pionnières [Cutter *et al.* 2000, 2003, Clark *et al.* 1998, Tapsell *et al.* 2002], la quantification de la vulnérabilité sociale en cas d'inondation s'est appuyée soit sur des techniques de réduction des données telles que l'analyse factorielle [Rygel

et al. 2006], soit sur des méthodes arithmétiques telles que les scores de normalisation [Wu *et al.* 2002, Chakraborty *et al.* 2005] pour composer des cartes de vulnérabilité territoriale basées sur des indicateurs composites. Ces approches traitent la vulnérabilité sociale comme une pré-condition, un état de fragilité sur lequel vient se surimposer l'aléa pour produire, par agrégation, une carte statique du risque socio-économique intégré. Les indicateurs sont choisis en fonction des connaissances théoriques (approche déductive) ou de l'analyse des données (approche inductive), tandis que les liens avec les observations liées à l'impact sont rarement pris en compte [Fekete 2009, Zahran *et al.* 2008].

Rufat *et al.* [2015] a analysé 67 cas d'inondations survenues entre 1997 et 2013 afin d'identifier les principaux facteurs pris en compte dans l'évaluation de la vulnérabilité sociale aux crues. Ils démontrent que les caractéristiques démographiques et socio-économiques, ainsi que les questions de santé et de capacité d'adaptation, sont les plus fréquemment citées dans la quantification de la vulnérabilité sociale. La fréquence varie en fonction du type d'inondation (par exemple, inondation fluviale ou crue soudaine), de la phase de la catastrophe (par exemple, crise ou récupération post-crise) et du lieu d'application (par exemple, pays développé ou en développement).

Dans la perspective de prendre en compte l'évolution du risque pour les populations, les deux méthodes de modélisation détaillées dans les sections 4.1 et 4.2 visent un objectif commun, celui de simuler les situations susceptibles de mettre en danger la vie humaine pendant la phase "événementielle" des crues soudaines, lorsque la majorité des décès surviennent [Ruin *et al.* 2008, Sharif *et al.* 2012]. Toutes deux portent sur la quantification d'une des causes principales de mortalité lors de ces événements liée à la mobilité quotidienne des populations exposées. Si les deux modèles s'attachent à prendre en compte les interactions critiques entre dynamiques de vulnérabilité et dynamiques hydro-météorologiques à l'échelle infra-journalière, ils diffèrent dans les méthodes et données employées. Le modèle MobRISK relève d'une micro-simulation à événement discrets utilisant les réseaux bayésiens, alors que le modèle déployé aux USA est un modèle probabiliste prédictif basé sur les techniques d'apprentissage automatique par forêts aléatoires.

Le développement de ces modèles de prévision des impacts humains pose également la question de l'usage de ce type d'information pour la gestion de crise. Ces prévisions probabilistes permettent-elles d'aider les décisionnaires à mieux prioriser les actions de protection pendant la phase de crise, ou à mieux communiquer envers les populations exposées pour éviter des mises en danger inutiles ? Pour tenter de ré-

pondre à ces questions, la dernière partie de ce chapitre décrit le développement d'un jeu sérieux destiné à mesurer l'impact de différents types d'information sur les décisions de mise en protection opérées par des joueurs, simulant les rôles des acteurs d'une cellule de crise, ayant à faire face à divers scénarios hydro-météorologiques dangereux.

4.1 Extrêmes hydro-météorologiques et exposition des mobilités quotidiennes : Le model MobRISK

COLLABORATIONS : Travail réalisé dans le cadre de la thèse de Saif Shabou (2013-2016), co-encadré avec C. Lutoff (PACTE).

Collaborateurs IGE : S. Anquetin, J. Blanchet, X. Beaufiles, B. Boudevillain, J.-D. Creutin, S. Debionne.

Collaborateurs extérieurs : C. Lutoff, S. Chardonnel et S. Durand (PACTE), H. Andrieu et O. Payrastra (IFSTTAR), E. Dubos-Paillard (Univ. Paris 1), K. Weiss (Univ. Nîmes).

PROGRAMME DE RECHERCHE : ANR Retour Post-Doc ADAPTflood, ANR Mo-biClimEx

PUBLICATIONS : Debionne *et al.* [2016], Shabou [2016], Shabou *et al.* [2017, 2019], Ruin *et al.* [2019]

L'exposition des populations aux aléas naturels est la plupart du temps abordée sous l'angle de l'exposition statique, par le biais d'une superposition des surfaces considérées comme inondables et de la localisation des bâtiments à vocation résidentielles ou professionnelles. Ainsi en 2013, l'observatoire du risque inondation du Gard a évalué à 35% la proportion d'habitants du département résidant en zone inondable et à 14,5% celle des entreprises gardoises qui y sont localisées. Néanmoins ces statistiques cachent de fortes disparités territoriales et ne prennent pas en compte la fluctuation de l'exposition humaine au cours de la journée du fait des déplacements quotidiens.

Si ce recensement est une première étape nécessaire, cela reste insuffisant pour faire l'état de l'exposition des populations aux phénomènes naturels dont l'occurrence est rapide et difficilement prévisible avec certitude. Les crues rapides touchent des bassins versants de petites tailles distribués sur un territoire lui même maillé par un réseau routier plus ou moins dense. Les intersections entre ces deux maillages hydrographique et routier sont autant de lieux potentiellement dangereux pour les usagers du réseau routier. En effet, comme évoqué précédemment, les analyses statistiques des décès liés aux crues rapides le montrent, 40 à 50% (voir plus de 60% aux USA) des accidents fatals

arrivent en situation de mobilité routière. L'analyse des accidents mortels impliquant l'usage de la voiture lors d'inondations soudaines montre que les hommes d'âge moyen sont plus enclins à de tels accidents. Pour savoir si ces observations sont plutôt le reflet d'une exposition « active¹» ou de comportements « passifs », il est nécessaire de répondre aux questions suivantes :

- Quel est le niveau d'exposition des individus aux crues rapides lors de leurs mobilités quotidiennes ?
- Ce niveau d'exposition varie-t-il selon les profils socio-démographiques des automobilistes ?
- Quels sont les effets de différents comportements d'adaptation (retour au domicile vs s'arrêter devant une route submergée ou retarder l'heure de déplacement) sur le niveau d'exposition des automobilistes ?
- Quels sont les effets de différents types d'attitudes (faible ou forte aversion à la prise de risque) et d'évaluation du danger sur l'exposition ?

La réponse à ces questions n'est pas triviale car elle oblige à prendre en compte la coïncidence spatio-temporelle entre la submersion des tronçons routiers et les trajectoires de déplacements quotidiens en tenant compte des processus décisionnels qui peuvent amener les individus à adapter (ou non) leurs mobilités aux circonstances perçues.

Au niveau hydro-météorologique, plusieurs avancées ont été enregistrées concernant le développement d'outils d'observation et de modélisation des dynamiques spatio-temporelles des crues rapides dans la région des Cévennes et le département du Gard. Des outils de modélisation hydrologique distribuée ont été développés afin de simuler les réponses hydrologiques sur les très petits bassins caractéristiques de ces régions [Anquetin *et al.* 2010, Braud *et al.* 2010, Vannier *et al.* 2016]. En complément, des méthodes d'analyse basée sur le recensement des coupures de route lors d'événements passés a permis de mieux prévoir la submersion des tronçons de route lors de tels événements [Versini *et al.* 2010, Naulin *et al.* 2013]. Du point de vue de la modélisation des comportements de mobilité, les besoins en matière de planification et de gestion de la demande de transport ont conduit aux développements de modèles dits

¹Selon la définition qu'en donne [Coates 1999], "*active*" behavior means that "rather than just happening to be in the wrong place, or trying to escape the flood, they were actively pursuing their line of employment, a reflection, possibly, of a more aggressive work environment"

« activité-centré » permettant de simuler les déplacements quotidiens à l'échelle individuelle. C'est sur la base de ces avancées méthodologiques que nous avons construit notre approche de modélisation de l'exposition des automobilistes aux crues rapides dans le Gard, un des départements français le plus fréquemment touché par ces épisodes dramatiques. Depuis 1225, le département du Gard a enregistré 511 crues pour lesquelles 65% des 353 communes cumulent au moins 10 crues référencées, certaines ayant même été affectées plus de 100 fois².

4.1.1 Le modèle MobRISK : Architecture et principe de fonctionnement

MobRISK est un outil de simulation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes développé à l'échelle d'un département français (pour l'instant le Gard). Cet outil combine 4 composants principaux (Figure 4.1) :

- un module permettant de simuler les changements environnementaux tels que le niveau de précipitation, la probabilité de submersion des routes, le niveau d'alerte... ;
- un module de mobilité activité-centré qui génère les déplacements routiers individuels sur la base d'emplois du temps journaliers attribués aux individus résidant dans la zone d'étude ;
- un module de décision qui génère des comportements individuels d'adaptation des mobilités quotidiennes face aux changements environnementaux perçus ;
- une base de données spatiales relationnelles.

Le **module de gestion des changements environnementaux** est constitué d'un simulateur à événements discrets (DES)³ qui représente les changements d'états d'un système donné comme une suite d'événements discrets. C'est à dire qu'au lieu de représenter l'état du système en temps continu, le DES ne prend en compte que les instants où un changement de l'état du système survient. Six types de changements d'état ou d'événements sont considérés : la submersion des routes, le déplacement d'individus,

²<http://www.noe.gard.fr/index.php/observatoire-du-risque-inondation/indicateurs?id=56>.

³codé en langage de programmation C++

la traversé de points de coupures, la fin d'activité (qui marque l'initiation d'un déplacement vers le lieu de l'activité suivante dans l'emploi du temps), la perception de signes environnementaux (changement de niveau de précipitation par exemple), l'information d'alerte ou de vigilance météorologique.

Le simulateur est connecté à une **base de données spatiales relationnelles**, permettant de stocker les données d'entrée et de sortie du modèle. Deux types de données d'entrée sont nécessaires au fonctionnement du modèle : i) des données sociales issues de l'INSEE⁴ pour décrire les caractéristiques socio-démographiques des individus et ménages résidant dans le domaine d'étude ainsi que leurs emplois du temps et mobilités quotidiennes, ii) des données spatiales pour localiser les individus et ménages, les réseaux routiers et hydrographiques, les potentiels points de coupures par submersion et débits simulés associés ainsi que les données de pluie pour l'événement étudié.

La base de données d'entrée développée dans le cadre du projet MobiCLIMeX permet de simuler les événements ayant affecté le Gard les 8-9 septembre 2002, 6-9 septembre 2005 et 20-23 octobre 2008, chacun représentant une distribution spatio-temporelle et des intensités de pluie très différentes. L'ajout d'autres événements réels ou virtuels touchant le Gard est possible facilement dès lors qu'est fourni un nouveau jeu de données hydro-météorologiques (pluies et débits). Par contre, si la structure de base de données reste identique, l'implémentation du modèle sur un autre département français demande de produire un autre jeu de données complet.

⁴Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

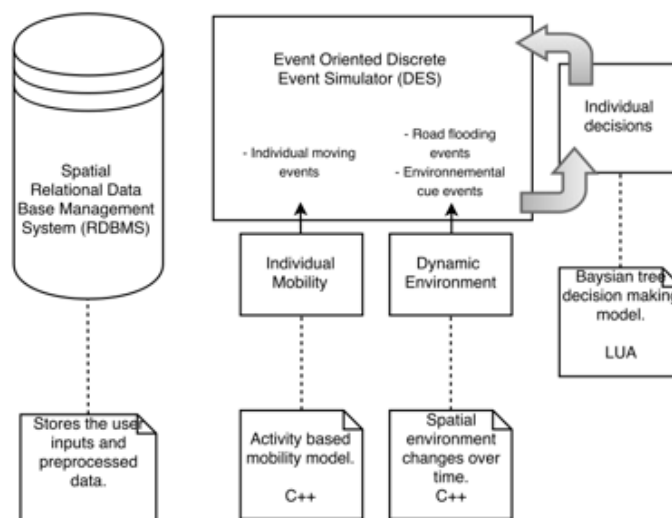


FIGURE 4.1 — Architecture du Modèle MobRISK. Sources : [Shabou 2016]*

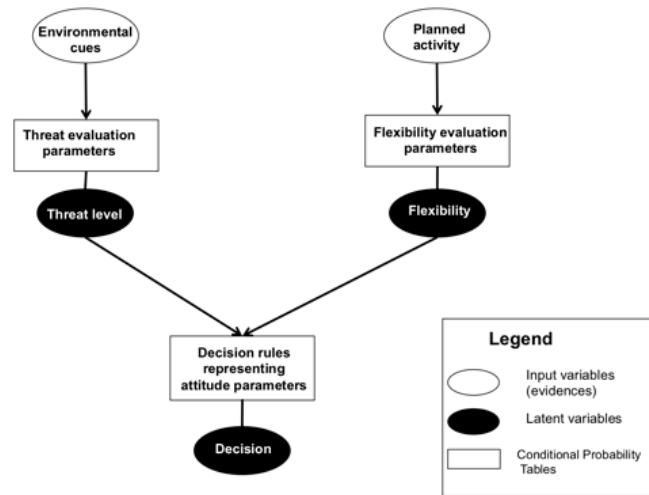


FIGURE 4.2 — Exemple de structure du réseau bayésien utilisé pour modéliser la décision individuelle d’entamer un trajet en voiture en fonction de l’évaluation du danger (elle-même conditionnée par la perception des signes environnementaux : niveau de précipitation et conditions de luminosité) et de l’évaluation du niveau de flexibilité de la prochaine activité prévue. Source : [Shabou 2016]*

Le **module de simulation des mobilités** permet d’attribuer à chaque individu de la zone d’étude, selon ses caractéristiques socio-démographiques, un emploi du temps composé d’une séquence d’activités (types d’activités et horaires associés) pour le ou les jours de l’événement de pluie considéré. Sur la base de cet emploi du temps et de la localisation des différents types d’activités qui le compose, le modèle associe un itinéraire à chacun des déplacements nécessaires pour de se rendre d’un lieu d’activité à l’autre. L’itinéraire est calculé grâce à l’algorithme Dijkstra [1959] sur la base du plus court chemin en temps. La localisation des lieux de résidence est relativement précise grâce aux données RP et RFL. Pour les activités “travail” et “étude”, les données MOB-PRO et MOBSCO indiquent les communes de destination. L’hypothèse de proximité avec le chef lieu de ces communes est faite pour obtenir un lieu plus précis. Pour les autres activités (loisir, achat...) aucune donnée n’est disponible et nous faisons le choix de localiser ces activités aléatoirement dans un *buffer* situé autour de la commune de résidence.

Le **module de décision** permet de tester différents scénarios de comportement sur l’exposition des individus aux submersions des routes. Le modèle de décision est déclenché lorsqu’un individu rencontre un tronçon de route submergé, reçoit une information d’alerte, perçoit une dégradation des circonstances environnementales ou termine une activité avant de se déplacer vers son activité suivante. La modélisation se base sur les réseaux Bayésiens pour mettre en relation les variables intervenant dans la

prise de décision (noeuds du réseau) et les causalités entre les variables sélectionnées (structure du graphe du réseau Bayésien). La quantification de ces relations de causalité est défini par des tables de probabilités conditionnelles (Figure ??). L'approche adoptée considère que les décisions d'adaptation des comportements de mobilité répondent à 3 composantes principales : i) l'évaluation du danger, ii) l'évaluation de la flexibilité et du niveau de priorité de la prochaine activité planifiée et iii) les règles de décision adoptées [Cools et Creemers 2013, **Ruin 2007b**, **Terti et al. 2015**]*. Quatre règles de décision sont implémentées dans le modèle : 1) continuer sans adaptation, 2) s'arrêter devant un point de coupure, 3) retarder la prochaine activité, 4) rentrer au domicile.

La construction de scénarios consiste à déterminer des schémas d'expérimentation en faisant varier deux types de paramètres d'entrée du modèle : i) le choix de l'événement hydro-météorologique à étudier (distribution spatio-temporelle des pluies-débits) et ii) les scénarios de décisions en changeant les tables de probabilités conditionnelles des variables d'évaluation du danger, de flexibilité des activités et d'attitude-type.

4.1.2 Les données d'entrée du modèle

Sensibilité du réseau routier aux crues rapides

La sensibilité du réseau routier est quantifiée sur la base de données géographiques de l'IGN à partir desquelles une méthode développée par nos collègues de l'IFSTTAR⁵ est appliquée pour identifier et classer la susceptibilité à l'inondation des intersections routes/rivières sur l'ensemble du département du Gard [Versini *et al.* 2010, Naulin *et al.* 2013].

Le réseau routier est extrait de la base de données vectorielles générale de l'IGN appelée BD-CARTO divisant le réseau en segments routiers élémentaires généralement définis entre deux carrefours. Le Gard dispose d'un réseau routier long de 12 321 km composé de 4 types de routes : les liaisons locales (84%), principales (5%), régionales (10%) et les autoroutes (1%). En regard, de ce maillage routier, il faut considérer le maillage hydrologique tiré de la base de données vectorielles BD-CARTHAGE de l'IGN. Ce réseau est composé d'un peu plus de 7 086 km de cours d'eau dont près de 90% des surfaces de drainage sont inférieures à 100 km², c'est à dire susceptibles de causer des crues éclair [**Debionne et al. 2016**]*.

⁵Institut Français des Sciences et Technologies, des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

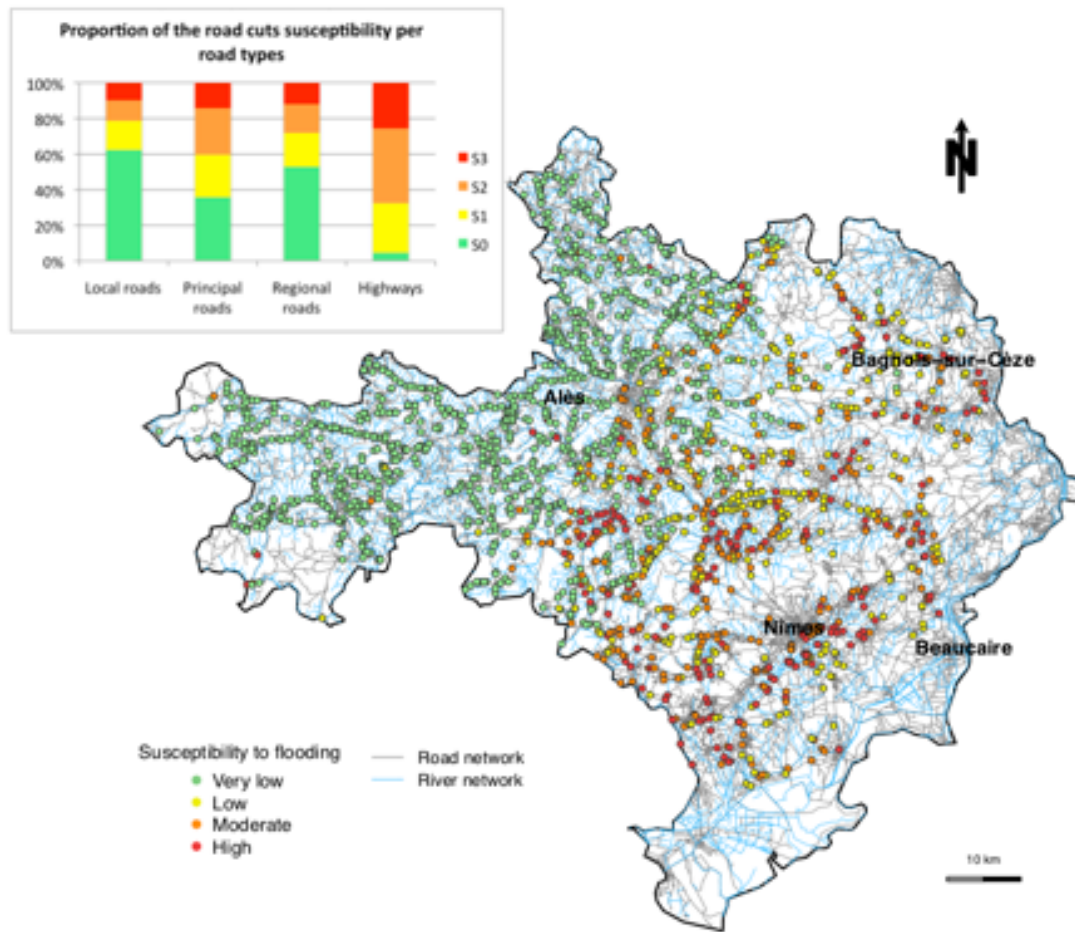


FIGURE 4.3 — Distribution spatiale des points de coupure potentielle selon leur niveau de susceptibilité. Le diagramme représente la répartition des niveaux de susceptibilités selon le type de route. Source : [Shabou *et al.* 2017]*

Les données de points de coupure (par submersion) potentielle sont issues des travaux de Versini *et al.* [2010], Naulin *et al.* [2013] qui ont élaboré une méthode d'apprentissage permettant de tirer partie de la base de donnée PICH répertoriant 40 années d'observations des submersions routières par des agents d'entretien du réseau sur une partie du département. Cette méthode a ainsi permis d'identifier 1970 points de coupure potentielle, soit 0,17 points/km de route, répartis en 4 classes de susceptibilité très faible (S0) à forte (S3) composées respectivement de 1093 (S0), 359 (S1), 297 (S2) et 221 (S3) points (Figure 4.3). La plus faible susceptibilité qualifie les intersections routes/rivières susceptibles d'être inondées pour une crue de temps de retour empirique supérieur à 40 ans. Les niveaux de sensibilité « faible » S1, « moyenne » S2 et « élevée » S3 correspondent à des inondations de temps de retour empirique inférieur à un an pour respectivement 20%, 35% et 65% des points **Debionne et al.** [2016]*.

Dans l'article de **Debionne et al. [2016]***, nous nous sommes amusés à comparer l'exposition du réseau routier mesurée par la méthode de l'IFSTTAR avec une estimation simplifiée basée sur l'hypothèse d'une distribution spatiale indépendante des réseaux routier et hydrographique assimilable au problème de *l'aiguille de Buffon*. Ainsi nous avons considéré que le réseau routier peut être assimilé à un quadrillage régulier et le réseau hydrographique à des segments linéaires (aiguilles) de longueur égale. Par cette méthode, nous avons calculé sur la base des longueurs totales des réseaux routier et hydrographique du Gard indiquées précédemment, que le nombre d'intersections route/rivière devrait atteindre 9496 soit 0,77 points/km de route. Ces chiffres sont 5 fois plus importants que ceux issus de la méthode de Versini et al. [2010], ce qui tend à montrer, si cela était nécessaire, que la planification de la géométrie du réseau routier et sa dépendance géométrique au réseau hydrographique permet de réduire l'exposition d'un facteur 5.

La distribution spatiale des points de coupure potentielle montre que les points de susceptibilité à l'inondation moyenne à forte se situent majoritairement dans une fenêtre bornée au Nord par les villes d'Alès et Bagnols/Cèze et se prolongeant au Sud jusqu'au delà de Nîmes (Figure 4.3). La majorité des points de coupure (60%) est localisée sur les liaisons locales et les liaisons régionales (27%) ce qui paraît logique puisque ces deux types de routes cumulent le plus grand kilométrage linéaire. Concernant le nombre de points de coupure potentielle par kilomètre de route, ce sont, dans l'ordre décroissant, les routes régionales (0,45 pt/km), les routes principales (0,39 pt/km), les autoroutes (0,31 pt/km) puis les liaisons locales (0,11pt/km) qui sont les plus exposées. Si l'on se focalise sur les niveaux de susceptibilité les plus forts (S2 et S3), ce sont les autoroutes et les liaisons principales qui affichent en proportion et en points de coupure/km l'exposition la plus forte.

Une autre façon de qualifier l'exposition des routes est de s'intéresser aux tailles des bassins versants associés aux points de coupure potentielle afin d'évaluer leurs sensibilités à l'inondation brutale (avec peu de signes précurseurs visibles) par la réaction très rapide d'un petit bassin versant. Concernant la distribution des points de coupure par aires drainées, nous observons que la majorité des points de coupure sont drainés par les bassins versants les plus petits : 83% appartiennent à des bassins de moins de 10 km², avec un temps de réponse théorique inférieur à une quinzaine de minutes [**Creutin et al. 2013**]. Parmi ceux-ci 16% ont une susceptibilité à l'inondation moyenne à élevée (S2 et S3). Les bassins de tailles moyennes (10 à 100 km²), montrent également une proportion de points de coupure de susceptibilité moyenne à élevée importante

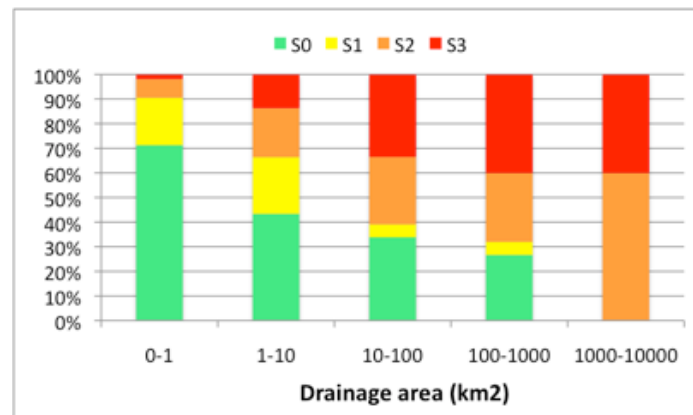


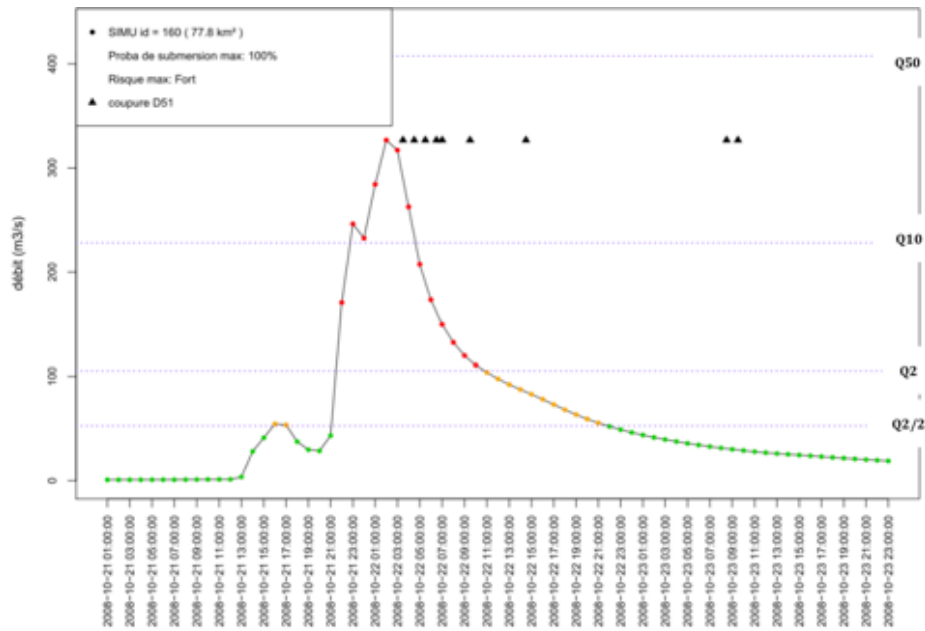
FIGURE 4.4 — Distribution des points de coupure potentielle selon la surface de drainage et le niveau de susceptibilité. Source : [Shabou *et al.* 2017]*.

(67% représentant 51 points au total). Quand aux très grands bassins (>1000 km²), seuls cinq points de coupure potentielle y sont localisés tous de sensibilité importante (S2 et S3) (Figure 4.4).

Les données événementielles : précipitations, probabilités de submersion

Dans le cadre du projet MobiCLIMeX, nous nous intéressés à la fluctuation de l'exposition du réseau routier du Gard en étudiant 3 scénarios de pluie correspondant à des épisodes réels pour lesquels i) les distributions spatiale et temporelle et les intensités de pluie sont bien différentes ; ii) nous disposons de données de coupure par submersion observées par les services de gestion des routes. Ces épisodes sont ceux des 8-9 septembre 2002, 6-9 septembre 2005 et 20-23 octobre 2008 qui selon les données d'observation ont respectivement causé la submersion de 136, 86 et 43 routes en plusieurs pics, pendant des jours de semaine ou de week-end et des horaires différents susceptibles, d'avoir un impact plus ou moins fort sur le trafic.

Pour ces trois événements, les débits au niveau des points de coupure potentielle ont été simulés à l'aide du modèle hydrologique distribué CVN [Anquetin *et al.* 2010, Branger *et al.* 2010, Braud *et al.* 2010] afin d'obtenir une chronique de crue aux différents points. Les débits simulés sont ensuite transformés en chroniques de probabilité de submersion en prenant en compte le niveau de susceptibilité de chacun des points considérés (Figure 4.5) [Naulin *et al.* 2013]. Ces chroniques de probabilité sont des données d'entrée du modèle MobRISK.



| Vulnérabilité | Débit de pointe simulé | | | | |
|---------------|------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|--------------|
| | $Q < Q_{2/2}$ | $Q_{2/2} < Q < Q_2$ | $Q_2 < Q < Q_{10}$ | $Q_{10} < Q < Q_{50}$ | $Q > Q_{50}$ |
| Forte | 0% | 0 à 67% | 67 à 100% | 100% | 100% |
| Moyenne | 0% | 0 à 33% | 33 à 57% | 57 à 61% | 61 à 100% |
| Faible | 0% | 0 à 20% | 20 à 34% | 34 à 35% | 35 à 100% |
| Très faible | 0% | 0% | 0% | 0% | 0 à 100% |

FIGURE 4.5 — Exemple de chronique de débits simulés pour un point de coupure potentielle de susceptibilité forte. Les points de couleur correspondent aux classes de probabilités affectées à chaque pas de temps (discret). Le tableau donne la correspondance entre le temps de retour des débits (annuel à cinquantiennale) et les probabilités de submersion selon le niveau de susceptibilité du point considéré.

Données démographiques et mobilités quotidiennes

La description socio-démographique de la population est basée sur les données de recensement fournies par l'INSEE en 2010. Nous utilisons en particulier l'ensemble des données de l'INDCVI, qui contient la description des caractéristiques socio-démographiques des individus, la composition du ménage et leur localisation géographique à la résolution municipale. Les déplacements domicile-travail et domicile-études sont décrits de manière exhaustive par les fichiers navettes MOBPRO et MOBSCO de l'INSEE pour l'ensemble des communes du Gard. Ce type de donnée nous sert à spatialiser plus précisément la géographie de ces déplacements (les flux) à l'échelle du département sur lequel sera situé le cas d'étude simulé.

Pour compléter ces données et identifier les dynamiques de l'exposition humaine aux différentes heures de la journée il est nécessaire de reconstituer les trajectoires spatio-temporelles quotidiennes des individus en conditions "normales", avant de si-

muler les comportements d'adaptation de ces pratiques en conditions hydro-météorologiques perturbées. Comme nous l'avons montré dans le chapitre 2, la mobilité quotidienne des populations résulte des besoins et désirs d'effectuer des activités dispersées dans l'espace et distribuées dans le temps. Les déplacements quotidiens permettent de relier les lieux d'activités et ils s'insèrent dans la planification à plus ou moins long termes des emplois du temps des individus.

Les données de déplacements des ménages résidants en France métropolitaine est disponible via l'Enquête Nationale Transports et Déplacements (ENTD) réalisée tous les 10-15 ans par le ministère chargé des transports et l'INSEE. Cette enquête renseigne les caractéristiques socio-démographiques des individus et de leur ménage ainsi que l'ensemble des déplacements effectués, dans un rayon de 80 km autour du lieu de domicile, lors d'un jour de semaine et un jour de weekend pendant la semaine qui précède le jour de l'enquête. Ainsi, la dernière enquête disponible, réalisée en 2007-2008, comporte une extension régionale Languedoc-Roussillon qui se base sur un sous-échantillon représentatif de la population de cette région.

L'analyse statistique des données du sous-échantillon de l'ENTD décrivant la région Languedoc-Roussillon nous apprend que les individus effectuent en moyenne 3,7 déplacements pour un jour de semaine et 3,2 déplacements pour un jour de week-end. Si le taux de mobilité des femmes est supérieur à celui des hommes la semaine, la tendance s'inverse le week-end. La tranche d'âge des 29-45 ans est en revanche largement la plus mobile, semaine (4,35) comme week-end (3,49). Du point de vue professionnel, les actifs et les chômeurs dépassent les quatre déplacements en moyenne la semaine, activité professionnelle et recherche d'emploi pouvant favoriser les raisons de multiplier les déplacements. Enfin, la taille des ménages (plus de 2 personnes) est liée à un plus grand nombre de déplacements du fait du besoin de gérer les activités des enfants par exemple.

Concernant les raisons de se déplacer, 40% des déplacements sont liés aux retours au domicile, environ 20% des déplacements quotidiens se dirigent vers les lieux de travail ou d'études et le reste se répartit entre les motifs liés aux achats, soins, démarches administratives et aux loisirs, visites. Cette répartition varie, sans surprise, entre la semaine et le week-end : les déplacements liés aux travail, étude, soins, accompagnements et démarches administratives sont plus nombreux les jours de semaine ; en retour, les déplacements liés aux achats, loisirs et visites sont plus nombreux les jours de week-end (Figure 4.6).

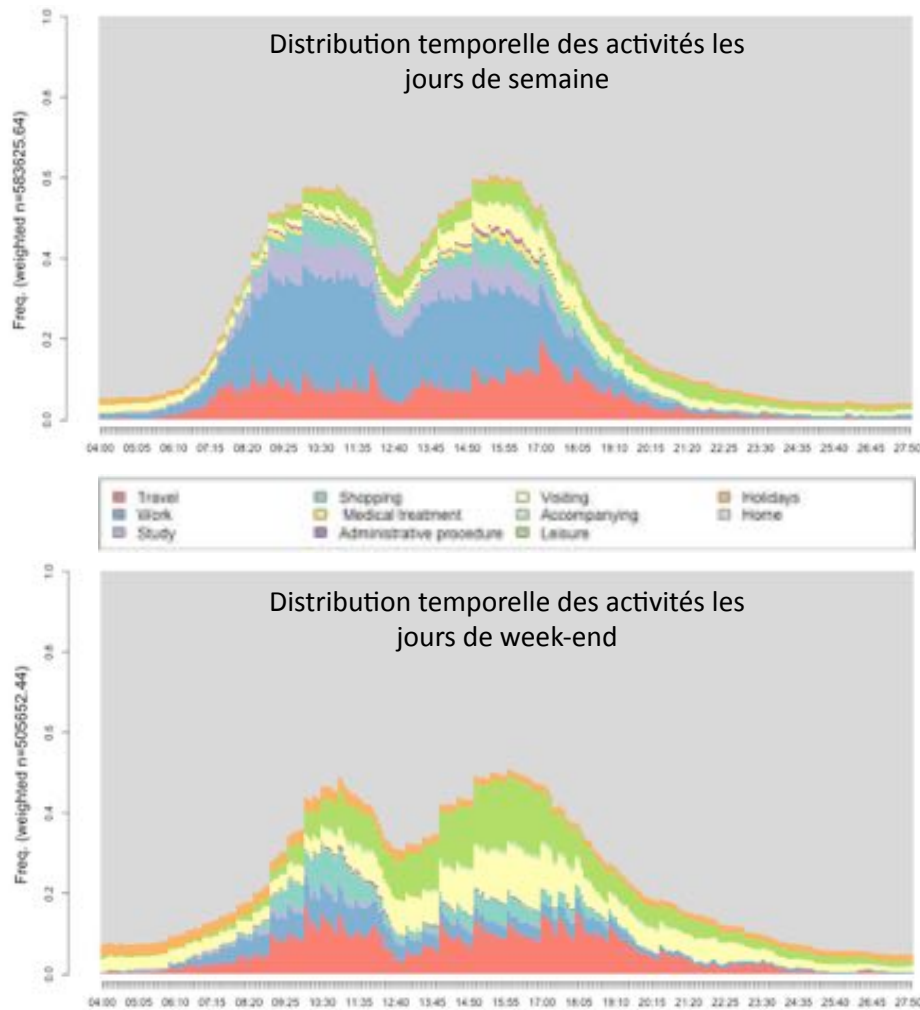


FIGURE 4.6 — Distribution temporelle des activités les jours de semaine et de week-end en Languedoc Roussillon (données ENT-D 2007-08, Source : Shabou [2016]).

En s'intéressant globalement à l'ensemble des séquences de déplacements et d'activités (déduites du motif entre deux déplacements) des individus enquêtés, nous pouvons rendre compte de la distribution temporelle des activités au cours de la journée. Ainsi, la figure 4.6 rend compte de la temporalité des activités en dehors du domicile réalisées majoritairement sur les périodes ante-méridienne et post-méridienne. Les déplacements suivent partiellement ce rythme puisque l'on note en semaine un pic en début de matinée et en fin de journée mais plus effacé sur la pause méridienne (effet de la journée continue et de la restauration sur le lieu de travail). Les déplacements du week-end sont en revanche plus étalés sur l'ensemble de la journée et décalés sur des horaires plus tardifs le matin comme en fin de journée.

Concernant les durées des activités, nous remarquons que les individus passent en moyenne 18 heures/jour à leur domicile en semaine et 19h/jour le week-end. Les

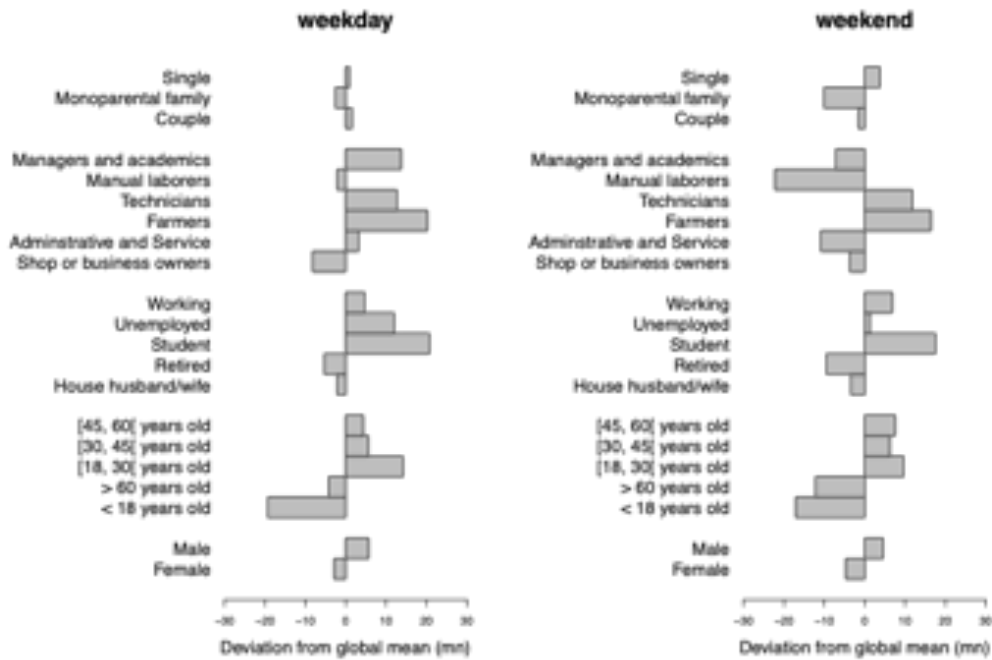


FIGURE 4.7 — Différence par rapport aux durées moyennes de transport par catégorie socio-démographique pour un jour de semaine ($D = 18\text{mn}$) et un jour de weekend ($D = 20\text{mn}$). Source : Shabou [2016]*.

durées de transport semblent être similaires entre un jour de semaine et de week-end. Cependant, elles varient selon les caractéristiques socio-démographiques des individus. En semaine, les hommes, les jeunes adultes et les étudiants passent plus de temps dans les transports. La différence globale entre les durées de transport en semaine et en week-end s'explique principalement par la profession (Figure 4.7).

L'enquête ENT-D n'étant pas représentative à l'échelle du département du Gard, nous avons choisi d'appliquer la méthode d'analyse de dissimilarité des séquences d'activités développée par [Studer *et al.* 2011] sur les données de déplacements issus de l'ENT-D afin d'identifier des règles d'attribution de séquences d'activités à la population de la zone d'étude considérée. Nous avons d'abord évalué l'association entre les séquences d'activités caractérisées par une matrice de dissimilarités et huit variables catégorielles (genre, âge, niveau d'éducation, statut professionnel, profession, taille et type de ménage, nombre d'enfant). Une analyse de variance (ANOVA) permet ainsi d'identifier les variables qui expliquent le mieux les différences entre les patrons d'activités-déplacements [Shabou 2016, Shabou *et al.* 2019*]. Ensuite, dans le but d'extraire des règles d'attribution de séquences d'activités en fonction des variables socio-démographiques, nous avons produit une classification des séquences par arbre de régression basée sur les résultats de l'analyse de dissimilarité (Figure 4.8). Par ce

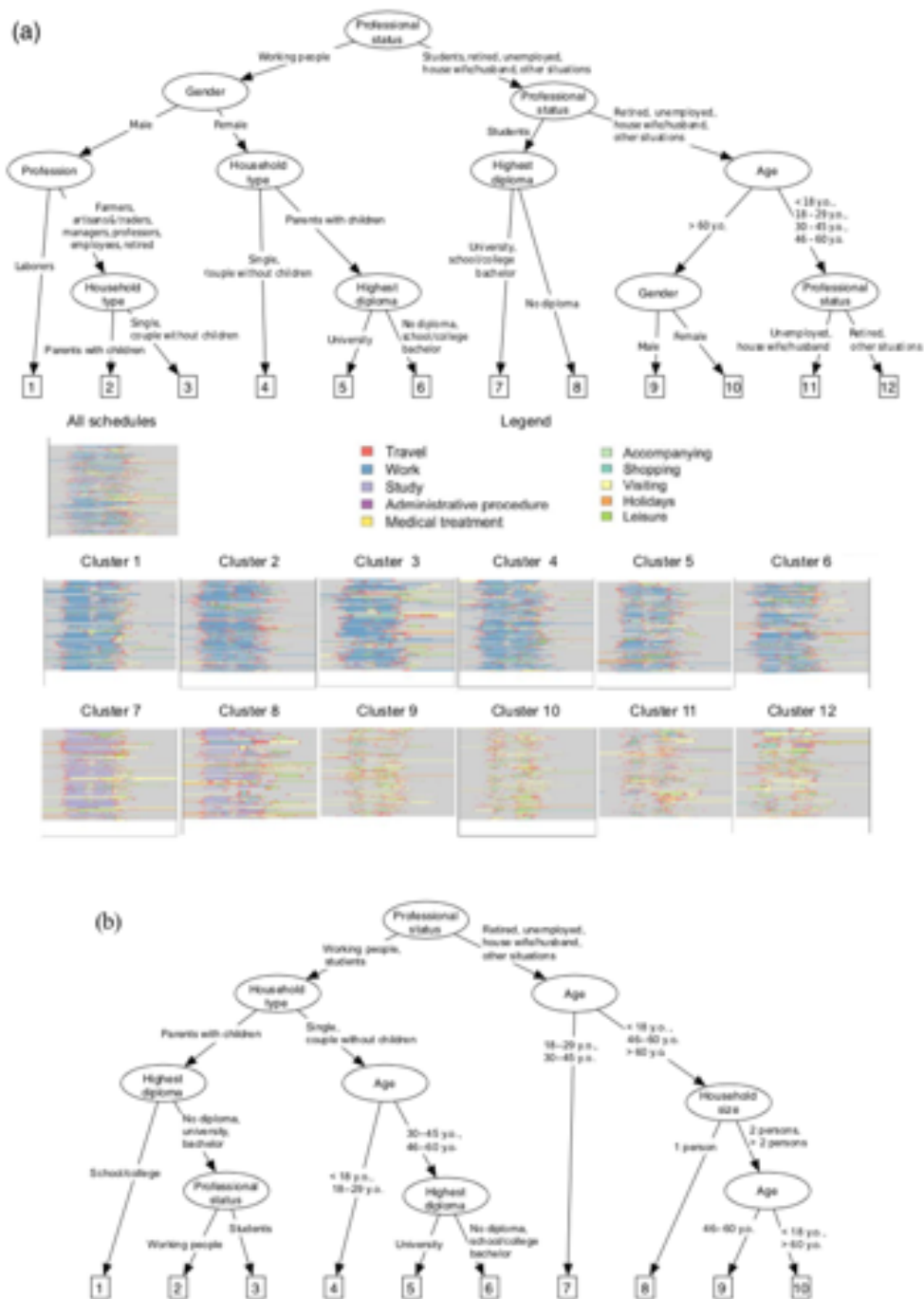


FIGURE 4.8 — Arbre de régression des séquences d'activités pour un jour (a) de semaine et (b) de week-end. La partie supérieure de la figure présente l'arbre de régression : chaque nœud représente la variable divisant les emplois du temps en deux groupes et chaque arc représente la catégorie discriminante. Une représentation visuelle des clusters d'emplois du temps des jours de semaine correspondant à chaque groupe est affichée au bas de (a) chaque activité est représentée par une couleur, et chaque ligne représente une séquence d'activités individuelle. Source : **Shabou et al. [2017]***.

pré-traitement des données, chaque individu de la zone d'étude a pu être rattaché à un emploi du temps hebdomadaire moyen et un emploi du temps de fin de semaine moyen en fonction de ces règles d'attribution. Ces emplois du temps servent à définir l'enchaînement et la temporalité des activités-déplacements routiniers de chaque personne de la zone d'étude sur le type de jour considéré (par exemple un jour de week-end et un jour de semaine pour simuler l'événement du 8-9 septembre 2002 qui a commencé un dimanche et s'est terminé le lundi).

Deux typologies représentent les séquences d'activités-déplacement de la semaine et du week-end. Pour la semaine, huit catégories ressortent de l'analyse scindant deux formes majeures d'organisation : celle centrée sur une activité principale comme le travail ou les études et celle dénuée de cette activité structurante (Figure 4.8). Au sein de la première forme se distinguent nettement les actifs des étudiants/scolaires. Les actifs diffèrent entre eux selon leur catégorie d'âge, les plus jeunes ayant des durées de travail plus longues et des déplacements plus matinaux. Au sein des jeunes actifs, les plus diplômés font des déplacements plus longs. Les étudiants et les scolaires ont des emplois du temps semblables grâce à l'activité "études", mais les étudiants ont la particularité d'avoir des activités plus variées et des déplacements plus longs notamment le soir (loisirs). La seconde forme d'emploi du temps regroupe les personnes "non-actives". Alors que les hommes non-actifs font des trajets plus longs et passent du temps dans les loisirs, les femmes (parmi lesquelles femmes au foyer et chômeuses sont sur-représentées) passent du temps en "visite" et "achat". Enfin, les retraités maintiennent des activités de visite, plus que de loisirs et tendent à rentrer plus tôt à leur domicile en fin de journée.

Six types d'emplois du temps se distinguent sur les journées du week-end. Alors que les personnes les plus jeunes (18-28 ans) consacrent leurs fins de semaine aux loisirs, les autres se dispersent entre les travailleurs du week-end (agriculteurs, cadres, ouvriers, commerçants, académiques) et ceux qui font des activités variées mais qui se distinguent selon leur statut professionnel.

Les mobilités quotidiennes décrites précédemment nous permettent d'envisager les conditions normales de déplacement. Nous retenons de cette première analyse que le nombre de personnes en déplacements fluctue selon les horaires de la journée, mais aussi selon le jour concerné (semaine ou week-end). L'exposition sur la route ne peut donc être résumée à une seule valeur moyenne. En outre, nos analyses montrent que le nombre de déplacements et, plus encore, leurs durées sont corrélés aux profils socio-démographiques des personnes. Il est donc important de considérer ce double facteur

(nombre et durée) pour estimer quelles catégories de personnes sont les plus exposées sur la route. Dans la section suivante nous nous intéressons aux facteurs d'adaptation des comportements individuels en fonction des conditions environnementales.

4.1.3 Résultats de simulation de l'exposition des automobilistes aux crues rapides dans le Gard

Le cas d'étude s'intéresse à une zone de 39 communes rurales et 22 communes urbaines localisées autour d'Alès où résident 111 511 personnes. Le secteur comprend 738 points de coupure potentielle de sensibilité à la submersion très faible à élevée dont la répartition est représentative de celle sur l'ensemble du département du Gard. Lors des crues de 2002, de nombreuses routes ont été submergées et une victime automobiliste a été recensée dans ce secteur.

L'objectif de la simulation MobRISK sur ce cas d'étude, est de quantifier l'exposition des automobilistes lors de cet événement au regard de l'unique décès, d'identifier les facteurs qui ont/aurait pu augmenter ou diminuer cette exposition (timing, perception et comportement ...) et le profil socio-démographiques des individus les plus exposés. Ainsi cette simulation vise à reconstituer les dynamiques spatio-temporelles de l'exposition humaine en identifiant les coïncidences spatiales et temporelles entre trajectoires individuelles de déplacement et submersion des routes.

Dynamiques d'exposition des mobilités quotidiennes aux submersions routières

Dans un premier temps nous avons évalué l'exposition individuelle sans tenir compte des comportements d'adaptation, en considérant que tous les individus maintenaient leur programme d'activité et leurs déplacements sans modification pour les 2 jours de l'événement. La simulation MobRISK lancée pour ces deux jours, comprenant un jour de semaine et un de week-end, a généré 737 135 déplacements avec un nombre moyen de déplacement par individu de 3,06 le dimanche et 3,64 le lundi.

La figure 4.9 permet de visualiser la dynamique temporelle du trafic aux points de coupure potentielle. Nous constatons l'occurrence de 2 pics d'exposition le dimanche (10h et 16h) et de 3 plus forts atteignant plus de 40 000 pers/h le lundi (7h, 13h et 17h), ces derniers correspondant essentiellement aux horaires de mobilités professionnelles et scolaires. En parallèle, la simulation des dynamiques de crue, montre que le risque

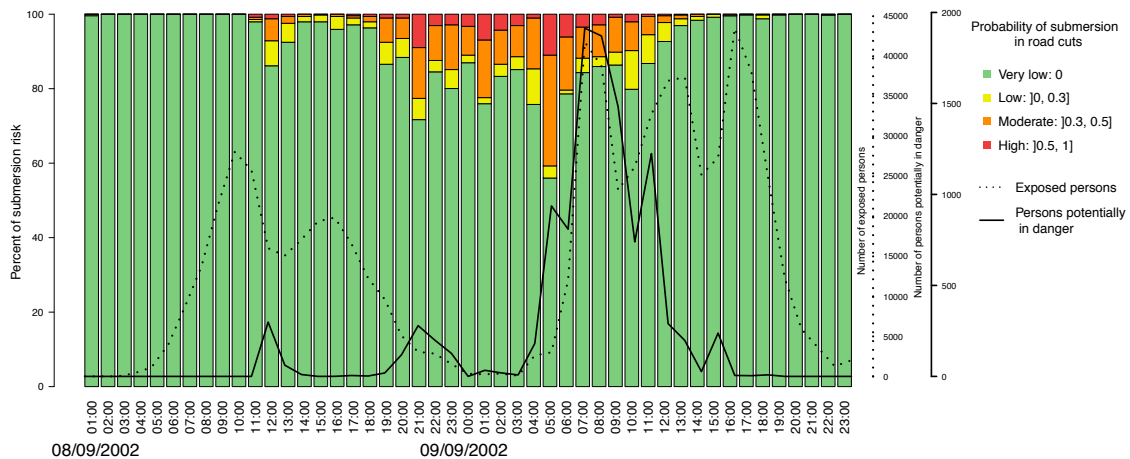


FIGURE 4.9 — Dynamique de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes dans le secteur d'Alès lors des crues rapides des 8-9 septembre 2002. Les barres colorées représentent les classes de probabilités de submersion des routes, la courbe en pointillés représente le trafic simulé au niveau des points de coupure et la courbe en ligne continue représente l'indice développé qui permet de mesurer le nombre d'automobilistes confrontés à des routes submergées. Source : Shabou [2016]*.

de submersion le plus élevé a lieu entre le dimanche 8 septembre à 21h et le lundi 9 à 6h. À cette période, les trafics simulés aux points de coupure potentielle sont les plus faibles. Enfin, afin de mieux caractériser l'effet combiné de ces deux dynamiques, nous avons construit un indice permettant de quantifier le nombre d'automobilistes passant aux points de coupures au moment de leur submersion, en pondérant ce nombre par la probabilité de submersion de chacun des points traversés. La courbe intitulée « Persons potentially in danger », résumant la dynamique de cette exposition au danger, montre que le moment le plus critique a eu lieu lors du pic de trafic du lundi matin, entre 7 et 9h (Figure 4.9). En moyenne sur l'événement, il faut compter 15 automobilistes en danger par point de coupure potentiellement submergé. Par contre le point de coupure, où s'est produit l'accident fatal en 2002, compte le passage de 162 automobilistes sur toute la durée de l'événement, l'une des valeurs maximales sur le secteur d'étude.

Nous avons également cherché à savoir si cette exposition était répartie uniformément selon les caractéristiques socio-démographiques des individus. Ainsi, nous avons défini l'exposition individuelle (E_i) comme la probabilité qu'un automobiliste traverse un point de coupure submergé sur les itinéraires parcourus durant la période de l'événement. Pour calculer cette exposition, il faut donc d'abord estimer la probabilité que tous les points de coupure traversés par un individu ne soient pas submergés. La probabilité complémentaire fournit ensuite la mesure de l'exposition individuelle. Sur la

base de ces calculs, nous montrons que 75% des automobilistes ont eu une exposition nulle pendant cet événement.

L'exposition individuelle moyenne est de 0,17 mais celle-ci varie significativement selon le genre, l'âge, le statut professionnel et la profession. Afin d'identifier les catégories socio-démographiques associées aux plus fortes valeurs d'exposition individuelle, nous avons réalisé une classification par arbre de régression (Figure 4.10). Ainsi, nous constatons que le statut professionnel (séparant les actifs des autres catégories) est la variable la plus discriminante suivie de la profession et de l'âge, le genre n'intervenant qu'en dernier lieu. Ainsi, les actifs, qu'ils soient techniciens, professions intermédiaires, ouvriers et cadres sont les plus fortement exposés (0,27 pour les femmes et 0,33 pour les hommes). Inversement les individus inactifs sont les moins exposés (0,11 en moyenne). Enfin, les étudiants et actifs exerçant les professions d'artisans, commerçants, agriculteurs et employés sont moyennement exposés (Eimoy = 0,24).

Ce lien entre caractéristiques socio-démographiques et exposition n'est pas sans rappeler les observations faites lors de l'analyse des circonstances des décès à l'échelle du département du Gard lors des crues de septembre 2002 [Ruin *et al.* 2008], ce qui tendrait à penser que l'exposition quotidienne joue un rôle prépondérant dans la vulnérabilité humaine aux crues rapides. Afin d'évaluer l'impact des attitudes face au risque, de l'évaluation du danger et des choix en matière de comportements de protection, nous avons effectué de nouvelles simulations, intégrant le module de décision, sur la base de scénarios faisant varier ces différents paramètres.

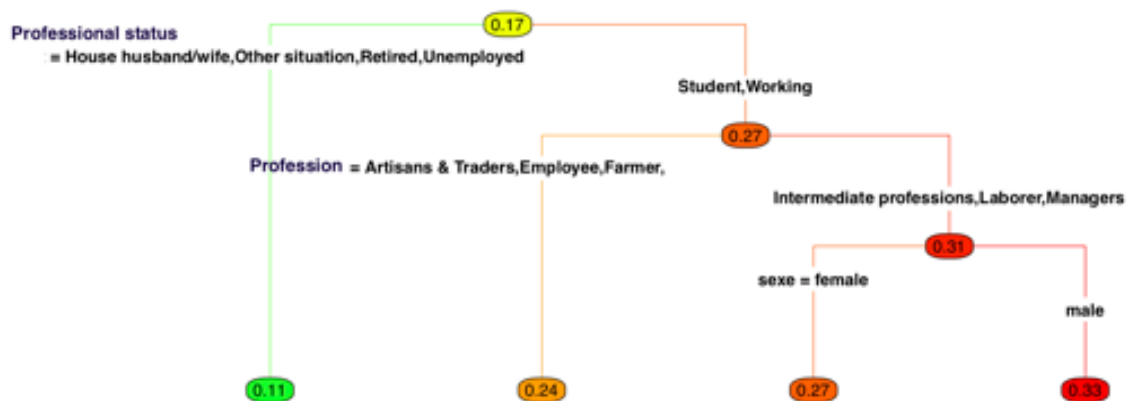


FIGURE 4.10 — Classification des individus en fonction des effets des variables socio-démographiques sur le niveau d'exposition. Source : Shabou [2016]*.

Influence des attitudes, de l'évaluation du risque sur les choix comportementaux et l'exposition individuelle

MobRISK a ensuite été appliqué au même cas d'étude mais au lieu de considérer que les individus ne modifient rien de leurs activités-déplacements quotidiens, le modèle de décision a été implémenté pour tenir compte des effets de 3 types d'adaptations comportementales liés à la perception des changements environnementaux. Les décisions de rentrer au domicile ("HOME") ou s'arrêter et attendre 60 mn devant une route submergée ("STOP") peuvent être prises lorsque les individus sont confrontés à une route submergée sur leur itinéraire (Figure 4.11). Les décisions "HOME" et décaler de 15mn l'heure de déplacement ("DELAY") sont les choix qui s'offrent aux individus qui terminent l'activité précédente et se préparent à un déplacement. Plusieurs scénarii ont ainsi été testés en faisant varier séparément ou conjointement les attitudes-types et l'évaluation du danger.

Quatre scénarios d'attitudes-types définissent la table des probabilités conditionnelles attribuée aux différentes décisions comportementales : i) attitude de non adaptation des comportements, ii) attitude de prise de risque (très faibles probabilités attribuée aux décisions d'adaptation), iii) attitude de neutralité (égalité de probabilité entre les décisions d'adaptation et de non adaptation) et iv) l'aversion aux risques (probabilités élevées attribuées aux décisions d'adaptation).

Trois scénarios d'évaluation du danger sont testés : i) une sous-estimation du danger revient à considérer que la perception du danger est toujours faible quelques soient les signes environnementaux ; ii) une évaluation "objective" du danger répartit les probabilités conditionnelles selon les niveaux de visibilité et de submersion des routes ; iii) une surestimation du danger considérant que la perception du danger est toujours forte quelques soient les signes environnementaux.

À l'issue des multiples simulations testant les différentes combinaisons de scénarii, je peux résumer les principaux résultats par les points suivants :

- L'adoption de règles de décisions correspondant à une attitude d'aversion au risque réduit de moitié l'exposition moyenne des automobilistes et divise par trois le pourcentage de personnes exposées.
- La surestimation du danger permet de réduire de moitié l'exposition des automobilistes par rapport à une estimation modérée.

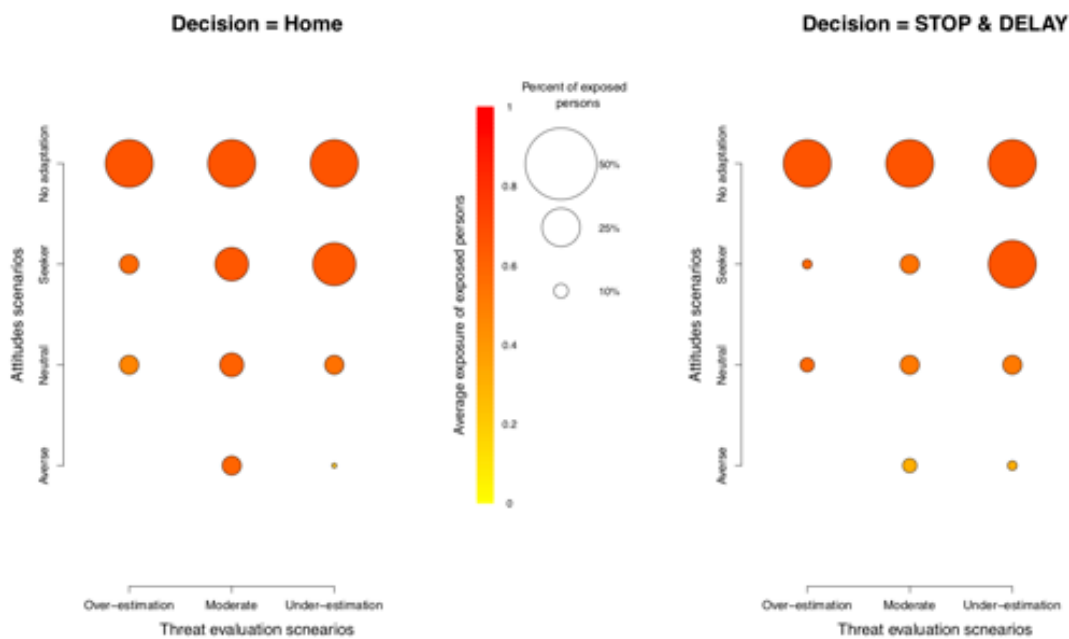


FIGURE 4.11 — Pourcentages de personnes exposées (taille du cercle) et niveaux moyen d'exposition (couleur) selon le croisement de scénarii attitude-type/évaluation du danger dans le cas a) d'un retour à la maison, b) d'un arrêt + attente de 60mn devant une route submergée. Source : Shabou [2016]*.

- L'adoption d'une attitude d'aversion au risque avec une surestimation du danger permet d'annuler complètement l'exposition des automobilistes.
- Les décisions de s'arrêter devant une route submergée ou bien de décaler les déplacements en re-planifiant les activités quotidiennes réduisent le pourcentage de personnes exposées et dans une moindre mesure leur niveau d'exposition par rapport à la décision de rentrer au domicile. Néanmoins, un petit nombre de personnes restent fortement exposé dès lors que l'on sort du scénario d'aversion au risque.

Les résultats obtenus montrent que le timing de l'événement ainsi que les choix d'adaptation comportementale sont des facteurs importants conditionnant le niveau d'exposition moyenne des automobilistes lors des crues rapides. À l'échelle individuelle, les caractéristiques socio-démographiques s'avèrent également de bons prédicteurs de la mobilité et donc de l'exposition aux submersions routières.

Si ce type de modèle demande une forte compétence en développement informatique ainsi qu'un temps de calcul élevé peu compatible avec des modèles de prévision à visée opérationnelle, nous avons choisi d'employer la modélisation probabiliste pour envisager la prévision des impacts humains à l'échelle des Etats Unis dans le cadre

d'une collaboration avec le *National Severe Storm Laboratory* (NSSL), qui est l'organe de recherche de la NOAA dédié à l'observation, la compréhension et la prédiction des événements météorologiques sévères en support aux prévisionnistes des *National Weather Services* (NWS) de la NOAA.

4.2 Modélisation probabiliste des impacts humains des crues rapides aux USA

COLLABORATIONS : Travail réalisé dans le cadre du stage de Master de Martin Calianno (2011-12), co-encadré avec J.J. Gourley, hydro-météorologue au NSSL (NOAA), Oklahoma, et de la thèse de Galatea Terti (2014-2017), co-encadrée avec S. Anquetin (IGE) et J.J. Gourley.

Collaborateur IGE : S. Anquetin, J. Blanchet.

Collaborateurs NSSL-NOAA : J.J. Gourley, P. Kirstetter, Z. Flamig, A. Arthur.

PROGRAMMES DE RECHERCHE : Labex OSUG@2020 ; Disaster Relief Appropriations Act of 2013 (PL 113-2), Flooded Locations And Simulated Hydrographs Project (FLASH, USA) (<https://blog.nssl.noaa.gov/flash/>)

PUBLICATIONS : [Calianno *et al.* 2013, Gourley *et al.* 2013, Terti *et al.* 2015, 2017, Terti 2017, Terti *et al.* 2019a]

Avec les mêmes objectifs de compréhension des facteurs de vulnérabilités sociales et de prédiction des événements à forts impacts que ceux du modèle MobRISK, j'ai eu l'opportunité de contribuer au développement d'un autre type de modélisation basé cette fois sur les données d'impacts socio-économiques directs causés par des crues rapides aux Etats Unis. L'hypothèse de base à l'origine de ce travail était de considérer les impacts socio-économiques et humains comme la résultante d'une conjonction spatio-temporelle défavorable entre la dynamique de l'aléa et celles de l'exposition et de la vulnérabilité sociale. L'idée était d'utiliser les données d'impacts de crues rapides du *Storm Events database* collectées depuis 1996 par le *National Weather Service* (NWS) de la NOAA pour :

- identifier les variables d'exposition et de vulnérabilité ayant le plus fort pouvoir explicatif des impacts observés,
- proposer un modèle statistique capable de prédire les impacts des crues soudaines sur la base de proxies représentatifs des dynamiques de l'aléa et de la vulnérabilité sociale.

Pour réaliser ce projet, plusieurs étapes ont été nécessaires. Dans un premier temps, une exploration des données d'impacts disponibles a été conduite afin de sélectionner, d'enrichir et de tester la cohérence des bases de données considérées [**Calianno et al. 2013, Terti et al. 2017**]*. Deux types de données d'impacts ont été utilisées, l'une provenant d'observations issues du grand public, et l'autre du recensement conduit par des experts du NWS : le *Severe Hazards Analysis and Verification Experiment* (SHAVE) et le *Storm event Database*. L'initiative SHAVE propose une nouvelle méthode de collecte d'observations à haute résolution en temps quasi réel sur les circonstances environnementales et leurs conséquences désastreuses (pertes matérielles et humaines) pour évaluer les outils de prévision radar [Gourley et al. 2010, **Gourley et al. 2013**]*.

Dans un second temps, les données de mortalité associées aux crues rapides ont été analysées afin de mieux comprendre la distribution spatio-temporelle et les circonstances socio-environnementales qui conduisent à l'occurrence d'accidents fatals liés aux crues rapides aux USA [**Terti et al. 2017**]*. L'analyse propose de mettre les circonstances des accidents (le lieu ou l'activité en cours au moment de l'accident) au coeur de nos investigations afin de considérer la vulnérabilité humaine situationnelle plutôt que générique en répondant aux questions suivantes :

- Quelles sont les circonstances accidentelles prédominantes associées à la survenue de décès lors d'inondations soudaines ?
- Quelle est la distribution spatiale de ces circonstances à l'échelle des états ou des comtés⁶ américains ?
- Comment sont distribués ces circonstances mortelles selon l'heure de la journée ou de la nuit ?
- Quels sont les profils socio-démographiques les plus vulnérables selon les circonstances de l'accident ?

La dernière étape utilise une approche empirique et prédictive pour estimer la probabilité qu'un ou plusieurs accidents mortels liés aux déplacements routiers lors d'épisodes de crues rapides se produisent, compte tenu de la conjonction de caractéristiques propres aux contextes hydro-météorologiques, à l'aménagement du territoire et aux profils socio-démographiques de la population concernée [**Terti et al. 2019a**]. Pour conduire cette analyse, nous avons appliqué la technique d'apprentissage automatique

⁶sub-division administrative des états américains

Random forest (RF) ou forêts d'arbres décisionnels afin d'identifier les meilleures variables prédictives et proposer un modèle permettant de prédire le risque d'occurrence de décès lors de crues rapides à la résolution du comté et de l'heure.

Avant de dévoiler les détails de ces étapes d'analyse, il est nécessaire d'explicitier le modèle conceptuel qui a servi de base à l'approche proposée.

4.2.1 Approche conceptuelle

L'originalité de notre approche repose dans l'idée d'intégrer dans un modèle simple aussi bien la variabilité spatiale et temporelle de la vulnérabilité à petite échelle (processus variant sur le temps court - infra-journalier et à l'échelle locale, voire individuelle) que celle de grande échelle (variant dans le temps long à des échelles territoriales/spatiales plus étendues) [Terti *et al.* 2015]*. Ainsi le modèle conceptuel proposé considère le risque de pertes humaines à un instant t comme le produit d'une interaction critique entre des variables représentant les dynamiques physiques et sociales en jeu lors d'un épisode de pluie-inondation (Figure 4.12). Le principal défi que soulève cette recherche consiste à trouver un compromis entre la prise en compte de facteurs de vulnérabilité liés aux comportements individuels et aux dynamiques hydro-météorologiques de très petites échelles tout en utilisant des données facilement accessibles à l'échelle nationale (habituellement définies par une résolution plus grossière) pour une recherche reproductible à l'échelle de l'ensemble des Etats Unis.

La figure 4.12 illustre notre façon d'appréhender le couplage entre circonstances physiques et sociales à l'origine des pertes humaines. Différents processus sociaux, qu'ils soient d'évolution lente ou rapide, à l'origine de l'exposition, la sensibilité où les capacités à faire face des individus sont pris en considération. Les processus "lents", de grande échelle, se caractérisent par des taux de changement allant de quelques mois à plusieurs années. Ils influencent les conditions préexistantes à l'inondation en matière de gouvernance du risque, d'aménagement du territoire ou de facteurs socio-cognitifs agissant plutôt au niveau des décisions individuelles (attitude, valeur, capital social, statut familial et professionnel...). Les processus en évolution rapide prennent quelques minutes à quelques jours et peuvent donc interagir avec les dynamiques des crues soudaines. Ces processus influencés par les facteurs de plus grande échelle, conditionnent les circonstances physiques et sociales de la crise ainsi que les circonstances très spécifiques dans lesquelles chaque individu abordera cette crise. Les "circonstances de crise" font référence aux caractéristiques de l'événement (p. ex. hauteur d'eau, extension de

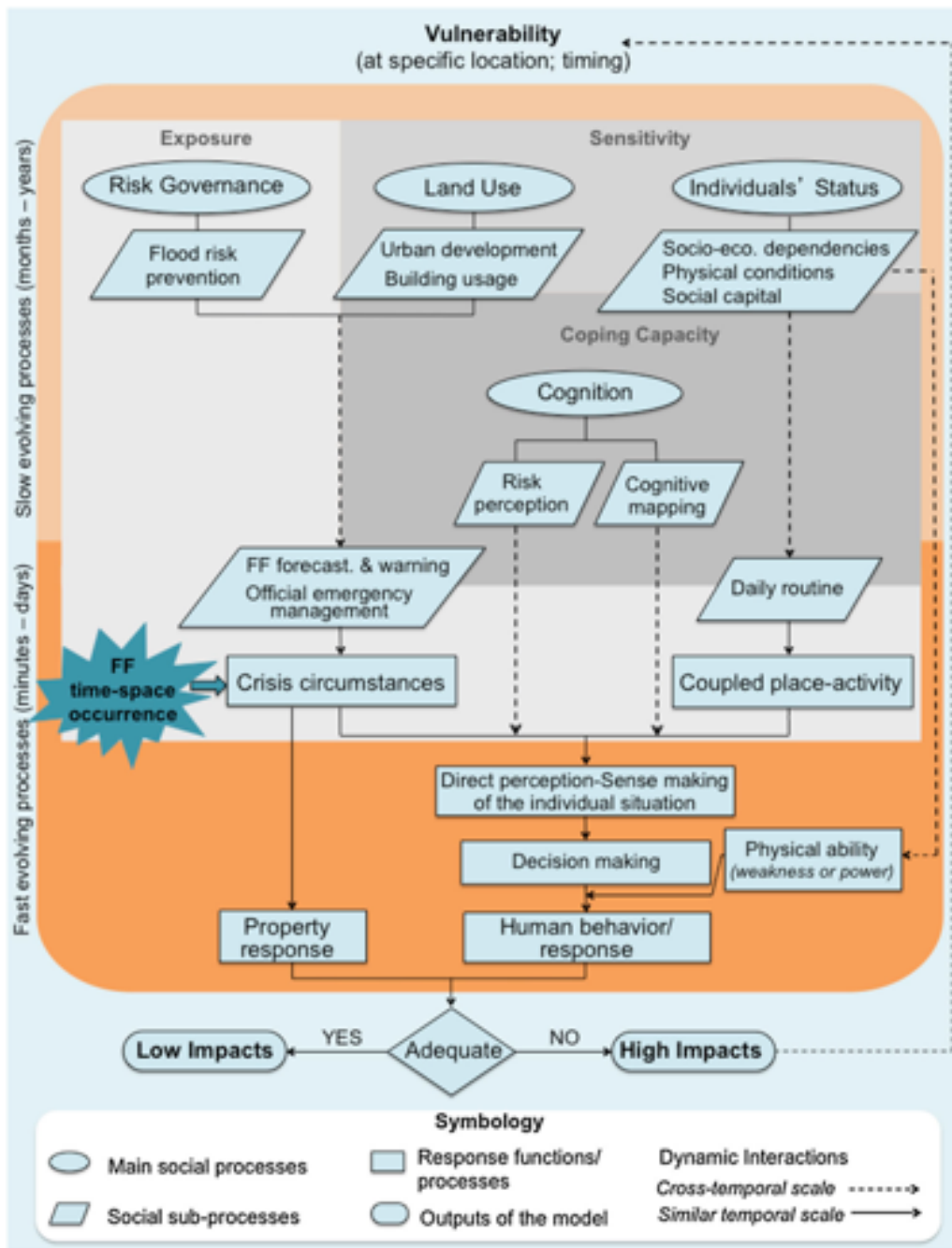


FIGURE 4.12 — Schéma de l'approche conceptuelle proposée pour le couplage des processus physique et sociaux à l'origine des impacts humains des crues rapides. Source : Terti *et al.* [2015], Terti [2017]*.

la crue, et vitesse des écoulements) et aux conditions de l'alerte et la gestion de crise. La nature et la dynamique des réactions des individus varieront selon l'endroit et l'activité qu'ils effectuaient lorsqu'ils ont ressenti le besoin d'agir (appelé "*coupled place-activity*"), et leur capacité à communiquer avec leurs proches ou à avoir des interactions sociales permettant une réponse collective [Gruntfest 1977, Mileti 1995, Drabek 2000, Lindell et Perry 2003, Ruin *et al.* 2014].

La partie inférieure du modèle décrit les interactions des processus cognitifs (p. ex. la représentation du risque, la familiarité avec les lieux, l'attachement émotionnel à la propriété) avec les "circonstances de crise" et les processus de "*coupled place-activity*" qui relèvent de la perception instantanée des opportunités et des contraintes à l'action des individus. Ces interactions sont très importantes puisqu'elles conduisent aux décisions, qui moyennant une capacité réelle à agir (c'est à dire s'il n'y a pas d'empêchement physique à exécuter la solution envisagée) sont implémentées sous forme d'actions concrètes mises en oeuvre pendant l'événement.

4.2.2 Ce que nous révèlent les données d'impacts socio-économiques aux USA

Deux types de données, SHAVE et NOAA/*National Centers for Environmental Information (NCEI) Storm event database*, ont été explorées pour caractériser les impacts des crues éclair aux USA. Les deux types de données sont construits à partir d'observations obtenues dans les heures (au plus le jour) qui suivent l'événement auprès de personnes expertes ou du grand public.

Analyse exploratoire des données de l'enquête SHAVE

La base de données SHAVE a été constituée dans le cadre du programme *Hazardous Weather Testbed* du *National Severe Storms Laboratory* de la NOAA et comprend des observations sur les événements potentiellement générateurs de dommages (initialement la grêle puis étendu aux vents violents et tornades, crues éclair et pluies verglaçantes) pour l'ensemble des États-Unis entre 2006 à 2015 [Gourley *et al.* 2010]. Les observations de dommages sont obtenues par enquêtes téléphoniques pendant les mois de juin à août auprès des résidents localisés dans les zones ayant fait l'objet d'une alerte météorologique pour l'un des événements d'intérêt.

La méthode d'échantillonnage des crues éclairs est ciblée sur la réponse des petits bassins (< 300 km²), c'est-à-dire que l'enquête est mise en oeuvre dans les zones répondant à l'un des 3 critères suivants : i) NWS a émis une alerte aux crues rapides, ii) les estimations radar dépassent les valeurs du *Flash Flood Guidance (FFG)*⁷ pour 1h,

⁷ FFG est une estimation de la quantité de pluie nécessaire sur une zone donnée pendant une durée donnée pour provoquer l'inondation de petits cours d'eau. Ces estimations sont basées sur l'humidité du sol et les conditions actuelles de débit des cours d'eau dans la région

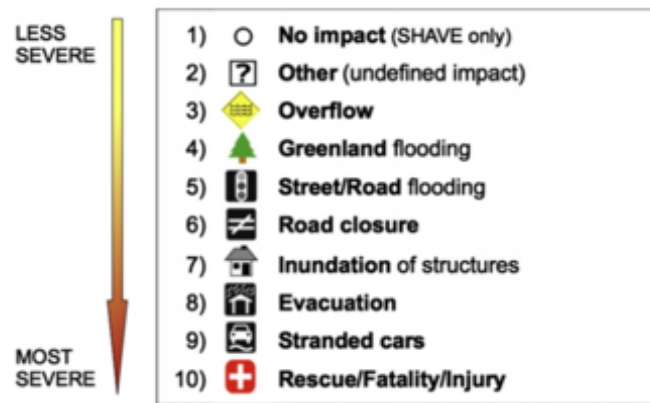


FIGURE 4.13 — Classification en 10 catégories des impacts basées sur les données SHAVE et NWS *Storm data* de 2008 à 2010. Source : **Calianno et al. [2013]***

3h ou 6h de période d'accumulation des pluies, iii) une enquête pour un autre type d'événement suggère également l'occurrence de crue.

Les rapports ont été classés dans Gourley *et al.* [2010] comme étant des événements nuls (c.-à-d. sans impact), mineurs ou graves, en utilisant les informations suivantes recueillies par le biais du questionnaire : type d'inondation, vitesse du ruissellement, hauteur d'eau et extension, occurrence d'évacuation/sauvetage et fréquence des inondations. La localisation et le moment de l'inondation sont inclus ainsi que des commentaires textuels. En comparaison du *Storm event database*, SHAVE fournit des observations sur l'absence de crues dans les régions averties (c.-à-d. fausses alarmes) et sur les inondations dans les régions non averties (c.-à-d. événements manqués).

Les données SHAVE et NWS storm data sur les années 2008-2010 ont été regroupées dans une base de données et complétées de quelques variables additionnelles permettant d'explorer les liens entre les types de dommages observés et les caractéristiques de territoire impacté. Pour tester le lien entre ces variables, une classification des impacts valable à la fois pour l'enquête SHAVE et pour les informations de dommages contenues dans la partie narrative de la description de l'épisode du NWS Storm Data a été proposée (Figure 4.13).

Une première exploration de ces données a permis de tester le lien entre la classification en 10 catégories d'impacts issue de la compilation SHAVE-NWS et cinq variables simples reflétant les conditions de susceptibilité et d'exposition aux crues rapides : pente locale, surface du bassin versant, indice topographique d'humidité (CTI)⁸, usage

(<https://www.weather.gov/ohrfc/FFG>)

⁸The Wetness index, ou Compound Topographic Index (CTI) combine la surface de drainage en

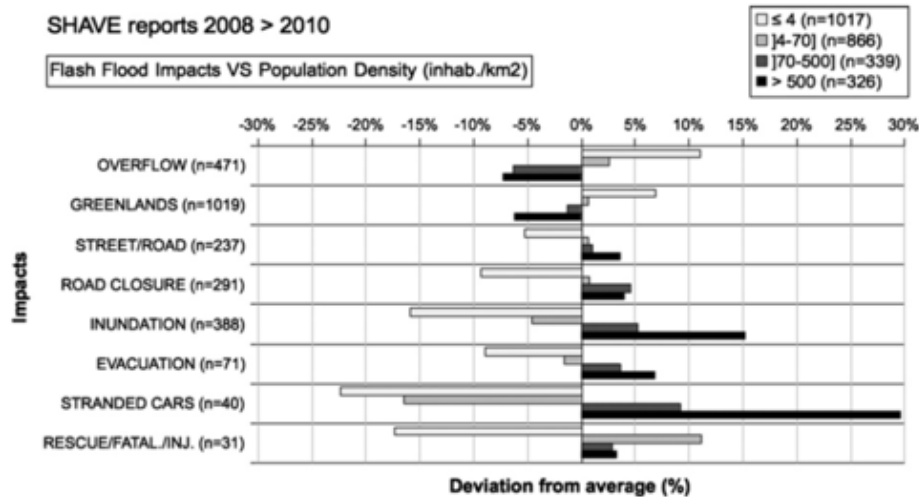


FIGURE 4.14 — Croisement entre la classification par types d’impacts issue des données SHAVE et les variables additionnelles “densité” de population. Source : **Calianno et al. [2013]***

des sols (NLCD 2006 land cover grille de résolution 30m) et densité de population (données du recensement de 2000 - grille de résolution 1km).

Sur la base des tests statistiques d’indépendance (χ^2 de Pearson) et du V de Cramer (Vc) mesurant la force de la relation, nous avons montré des liens significatifs ($\rho = 0,000$) entre les types d’impact et la densité de population (Vc=0,19), l’usage des sols (Vc=0,14), et dans une moindre mesure la taille du bassin versant (Vc=0,08). Ainsi si une plus forte densité de population est plutôt associée aux impacts les plus sévères tels que les évacuations ou les inondations du réseau routier, des véhicules ou des bâtiments, le signal est moins clair pour ce qui concerne la catégorie “sauvetages et morbidité” qui est en particulier liée à une densité de population moyenne à faible (4 à 70 hab/km²) (Figure 4.14). Le croisement type d’impact VS usage des sols confirme ce résultat, sauf pour la catégorie “sauvetages et morbidité” qui est cette fois associée aux zones de développement urbain les plus intenses (>49% de surface imperméable), ce qui peut être expliqué par la différence entre zone résidentielle et zone de transit (fortement imperméabilisé mais n’accueillant pas forcément beaucoup de résidents permanents). Enfin, la taille du bassin versant montre que les surfaces les plus grandes (>20 km²) ne sont pas associées avec les impacts les plus sévères, alors que les tailles de bassins entre 0,75 et 20 km² sont plus souvent associées aux évacuations, aux sauvetages et à la morbidité.

amont et la pente locale. Elle est généralement utilisée pour quantifier le contrôle topographique sur les processus hydrologiques et décrit l’accumulation d’eau dans les sols.

Les impacts humains répertoriés par le NWS Storm data

Le *Storm event database* rassemble des informations sur 4 types d'impacts (i.e. personnes décédées, blessées, dommages économiques et dommages aux cultures) qui ont pu être observés suite à l'occurrence de crues éclair⁹ sur l'ensemble du territoire des États-Unis. Les instructions données aux agents en charge de recenser les événements indiquent de catégoriser une "crue" comme "rapide" (*flash flood*) ainsi : "*A rapid and extreme flow of high water into a normally dry area, or a rapid water level rise in a stream or creek above a predetermined flood level, beginning within six hours of the causative event (e.g., intense rainfall, dam failure, ice jam-related), on a widespread or localized basis*".

Les services locaux de prévision du NWS recensent les données d'impacts venant principalement de sources officielles (forces de l'ordre et services de secours) et d'observateurs avertis tout au long de l'année et les répertorient sous forme de points géolocalisés de façon plus ou moins précise (avant octobre 2006) ou de polygones (d'octobre 2006 à aujourd'hui). En complément, d'autres sources d'information issues des médias (journaux, radios, médias sociaux...), compagnies d'assurance et grand public sont également considérées. Ces rapports sont censés être complets pour tous les événements de crues éclair prévus et survenant dans chacune des 122 zones de responsabilité des bureaux locaux de prévision. Le principal objectif de ce jeu de données est de vérifier les avertissements émis par les services locaux du NWS. Ainsi, cette base de données recense uniquement les événements ayant fait l'objet d'un avertissement météorologique et pour lesquels des dommages ont été constatés, c'est-à-dire que les fausses alertes, les événements non prévus et ceux se produisant dans des zones sans témoins ne sont pas considérés [Gourley *et al.* 2010].

Deux types de fichiers sont disponibles :

- l'un comprenant la description détaillée de l'événement sous forme de texte, l'estimation chiffrée des dommages (matériels et/ou dégâts aux cultures) et des victimes (morts et blessés) ainsi que la date et si possible l'horaire approximatif du début et de la fin de l'événement ;
- l'autre synthétisant les informations disponibles (âge, genre, circonstance du décès catégorisée sur la base d'informations textuelles) sur les victimes décédées lors de cet événement.

⁹au total 48 types d'événements météo-climatiques tels que grêle, vagues de chaleur, ouragans, inondations, crues rapides, tornades, feux de forêt... sont répertoriés

Les données NWS utilisées documentent 63 176 événements de crues rapides recensés sur l'ensemble des Etats Unis entre 1996 et 2014. Parmi ceux-ci 705 ont causé au moins un accident mortel, pour un total de 1075 décès et 6028 blessés. La distribution spatiale des victimes fait ressortir l'état du Texas comme le plus touchés par ces événements meurtriers (19% des accidents s'y produisent) suivi de loin par l'Arizona, le Missouri et l'Arkansas (entre 6 et 5%).

Dans le but de prévoir les accidents mortels, nous nous sommes ensuite intéressés aux circonstances des décès classées par le NWS Storm data selon 13 catégories. Ces catégories présentaient un nombre d'observation très variable, de 502 pour la circonstance "véhicule-related" (VE) la plus fréquente à 1 pour "business" ou "under tree". De plus, la deuxième catégorie la plus fréquente (278 observations) intitulée "in water" ressortait comme une catégorie "fourre tout" regroupant les décès par noyade qu'ils soient, par exemple, consécutifs à l'usage de la voiture ou au fait d'être piégés dans un bâtiment. Pour permettre une analyse statistique pertinente, une analyse textuelle de l'ensemble des descriptions associées à chacun des accidents a permis de réduire le nombre de catégories à six (Vehicle-VE, Outside/close to stream-OU, Campsite/recreation area-CA, Permanent Building-PB, Mobile Home-MH) et d'augmenter l'homogénéité intra-classe des cas décrits.

La distribution des circonstances fatales à l'issue de cette re-classification montre une prépondérance des décès liés à l'usage de véhicule (VE) qui représentent 63% des circonstances des décès. La deuxième catégorie la plus fréquente rassemble les décès en extérieur (OU), pour 21%, concernant des personnes emportées par les eaux à proximité d'un ruisseau ou alors qu'elles essayaient d'enjamber une portion inondée pour rejoindre des proches, sauver des biens. Parmi ces cas on retrouve une assez faible proportion (13% de motifs connus) liée à des activités de sauvetage ou d'évacuation (Figure 4.15). La Troisième catégorie représente les décès dans les aires de campings ou les terrains récréatifs (CA=7%). Le nombre total de décès associés à cette circonstance est bien moindre en comparaison des deux précédentes. Néanmoins cette catégorie affiche le plus grand nombre de morts par événement (2,2 comparé à 1,5 et 1,2 respectivement pour les catégories VE et OU), ce qui tend à montrer que les VE et OU touchent des cibles plus isolées que CA où les victimes se font surprendre en groupe [Terti *et al.* 2017]*.

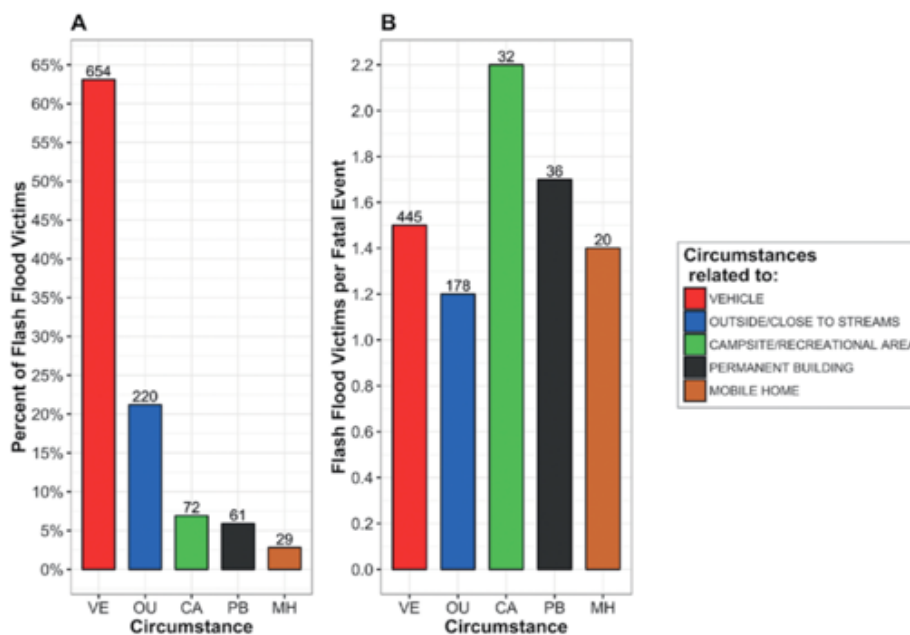


FIGURE 4.15 — A) Pourcentage et nombre (figurant en haut de chaque barre) de victimes de crues soudaines par type de circonstance. Ne sont représentés que les 1036 décès dont les circonstances sont explicites, la catégorie “Autres” (OT) n’est pas représentée. B) Nombre d’événements fatals (figurant en haut des barres) et de victimes/événement et par circonstances répertoriés aux USA entre 1996 et 2014. Source : Terti [2017], *Terti et al. [2017]**

Les circonstances accidentelles révélatrices des dynamiques d’exposition et de vulnérabilité humaine

En référence à mes premiers travaux liant profil de vulnérabilité humaine et surfaces de bassin versant [Ruin *et al.* 2008, 2009], le but de notre analyse était d’explorer le lien entre différentes formes de vulnérabilité humaine déterminées par le profil et l’activité des victimes au moment de leur accident, au contexte spatio-temporel de l’épisode hydro-météorologique en cause. Ainsi, une analyse statistique poussée nous a permis de montrer que les circonstances associées aux décès lors de crues soudaines sont associées à différentes caractéristiques liées à la saison, à l’heure du jour, à la durée de l’inondation, à la localisation, et aux catégories de genre et d’âge.

En accord avec d’autres études, nous avons ainsi mis en évidence que les décès associés à l’usage d’un véhicule pendant la période de crue touchent principalement des hommes [Ashley et Ashley 2008, Spitalar *et al.* 2014]. La distribution spatiale de ces accidents montrent qu’ils sont plus fréquents dans les États du sud. A la différence des accidents liés aux véhicules qui se produisent souvent en fin de journée ou de soirée, les 21% de décès se produisant en extérieur (OU) apparaissent plus probables dans

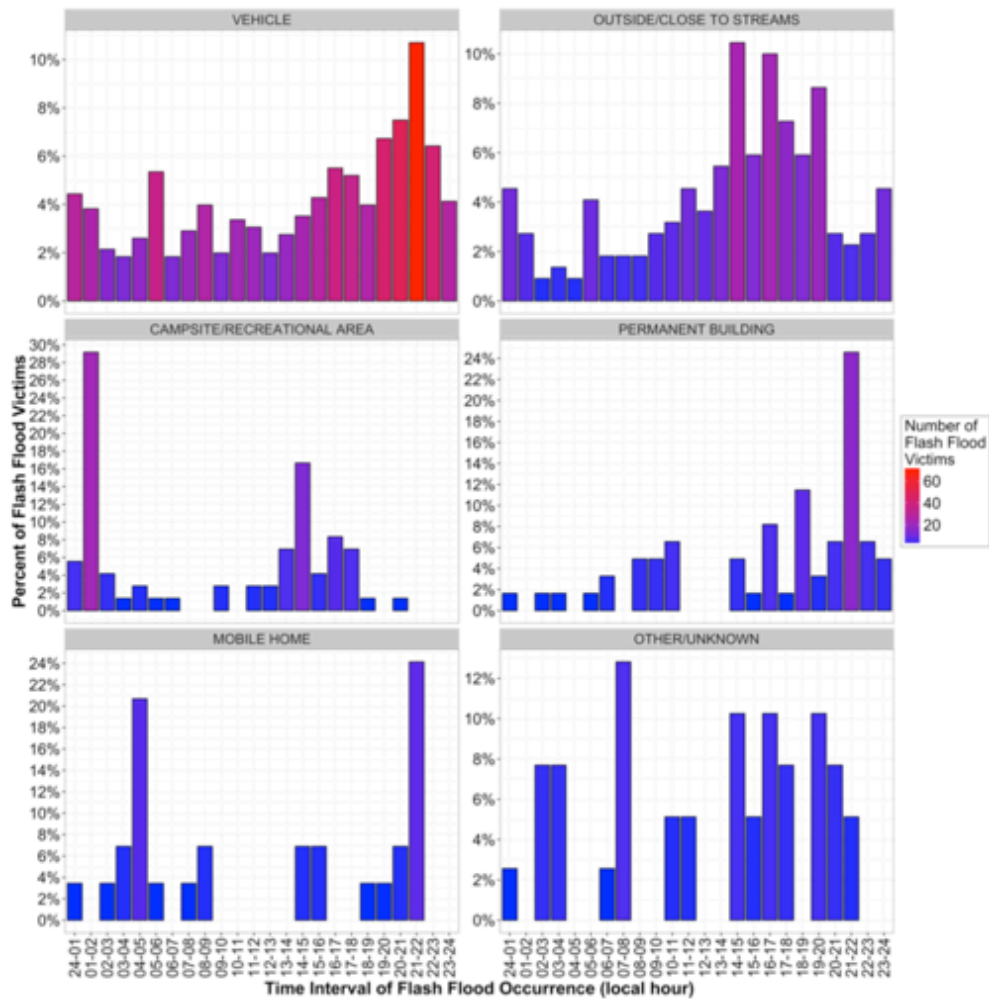


FIGURE 4.16 — Pourcentage du nombre de victimes de crues éclair selon les circonstances des accidents et l’horaire du pic de crue. La couleur des barres indique le nombre de victimes associées aux événements survenus dans cet intervalle horaire et pour cette circonstance. Source : Terti [2017], **Terti et al. [2017]***

l’après-midi et touchent principalement des enfants ou adolescents de sexe masculin souvent emportés par les cours d’eau lors d’activités ludiques en périodes de hautes eaux (Figure 4.16).

Dans notre analyse, qu’il s’agisse d’accidents mortels “en véhicule (VE)” ou “en extérieur (OU)” les hommes avaient respectivement, 2,6 et 1,4 fois plus de chance d’être impliqués que les femmes. L’âge médian des hommes décédés est de 22 ans pour les circonstances “OU” et de 44 ans pour les circonstances liées aux véhicules (VE) (Figure 4.17). Au USA, la plupart des décès liés aux espaces récréatifs et de camping (CA) sont associés à des crues à réaction très rapide (événement durant en majorité moins de 3 heures), se produisant le plus souvent après minuit et touchant des personnes dans la force de l’âge, là encore en plus grande majorité du genre masculin. Par contre,

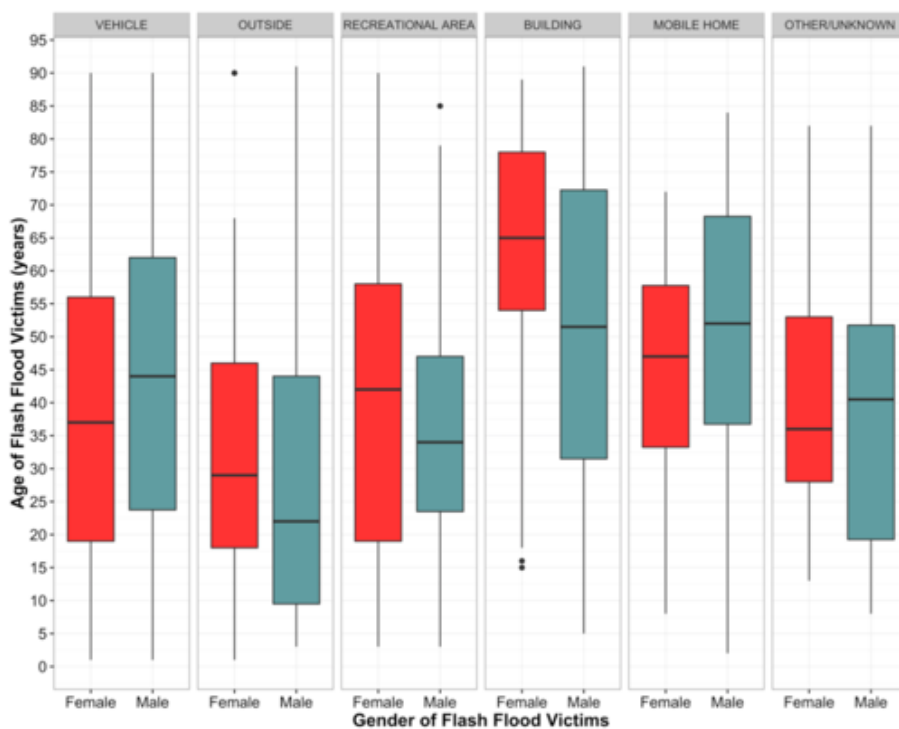


FIGURE 4.17 — Répartition par âge et genre des victimes de crues éclair selon les circonstances des décès survenus entre 1996 à 2014 (n = 1 003). Source : Terti [2017], Terti *et al.* [2017]*

les décès liés à l’inondation de bâtiments permanents (“en dur”) sont le plus souvent associés à des événements de plus longue durée (durée médiane de 9h) et touchent des personnes plus âgées (age médian de 52 ans pour les hommes et 65 ans pour les femmes), en particulier au crépuscule et dans l’obscurité, lorsque les opérations de sauvetage et/ou d’évacuation sont entravées (Figures 4.16 et 4.17). Ces conclusions basées sur des analyses statistiques robustes étayent et renforcent la tendance que j’avais pu déceler par l’analyse des cas de décès lors des crues du Gard de septembre 2002 [Ruin *et al.* 2008, 2009].

Finalement, les accidents fatals liés aux “Mobile-Homes” (MH) affichent un profil intermédiaire entre les circonstances d’extérieur au sens large (VE, OU et CA) et celle d’intérieur (PB), que ce soit en termes de durée d’événement (env. 7h) que de classe d’âge (médiane entre 47 et 52 ans respectivement pour les femme et les hommes) à la différence notable, comparée à toutes les autres circonstances, de la prépondérance des femmes parmi les victimes (65% VS 35% d’hommes) (Figure 4.17).

Ainsi, il apparait clairement que les crues soudaines posent un problème sensiblement différent en termes de vulnérabilité humaine que celui du “grand âge” et du

genre féminin généralement mis en avant dans le contexte des risques naturels. Ainsi les femmes et les personnes âgées décèdent en moins grande proportion pendant les épisodes de crues soudaines que les hommes jeunes ou dans la force de l'âge qui payent un lourd tribut dans toutes les circonstances étudiées sauf celle associée aux parc de Mobile-Home.

L'analyse temporelle des circonstances de décès a également permis de montrer que la vulnérabilité humaine varie de manière dynamique sur une base infra journalière et dépend de conjonction entre facteurs sociaux (rythmes des activités quotidiennes notamment) et naturels (temporalité des pics de crue) comme nous l'avions également montré dans le cadre de la mise en oeuvre du modèle MobRISK précédemment décrit. Ces résultats soulignent l'importance d'une évaluation spécifique aux circonstances de décès dues aux crues soudaines pour guider le développement d'une modélisation des risques humains qui permettent aux gestionnaires de crise une meilleure anticipation des situations de grand danger nécessitant la mise en protection de personnes ou la diffusion de consignes de sécurité ciblées.

4.2.3 Construction d'une base de données pour la prédiction des décès liés aux crues soudaines

La majorité des travaux visant à identifier à grande échelle (celle de la nation par exemple) les zones à risque et considérant la conjonction des facteurs naturels (aléa) et sociaux (vulnérabilité) utilisent des facteurs génériques peu spécifiques aux types d'aléas considérés ou à la temporalité (phase de crise ou d'inter-crise). En partant des observations d'impacts des crues soudaines, nous avons souhaité identifier les variables, produites de manière standardisée par différents fournisseurs, permettant d'expliquer la distribution spatiale et temporelle des impacts humains survenant en conséquence directe de la phase de crise.

La construction d'une base de données spécifique (Figure 4.18) aux besoins de la prédiction probabiliste des décès liés aux crues soudaines vise à répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les variables sociales et physiques disponibles, à l'échelle de l'ensemble des Etats Unis, à des résolutions spatiales et temporelles compatibles avec l'objectif de prévision d'événements de crues rapides impactant différentiel-

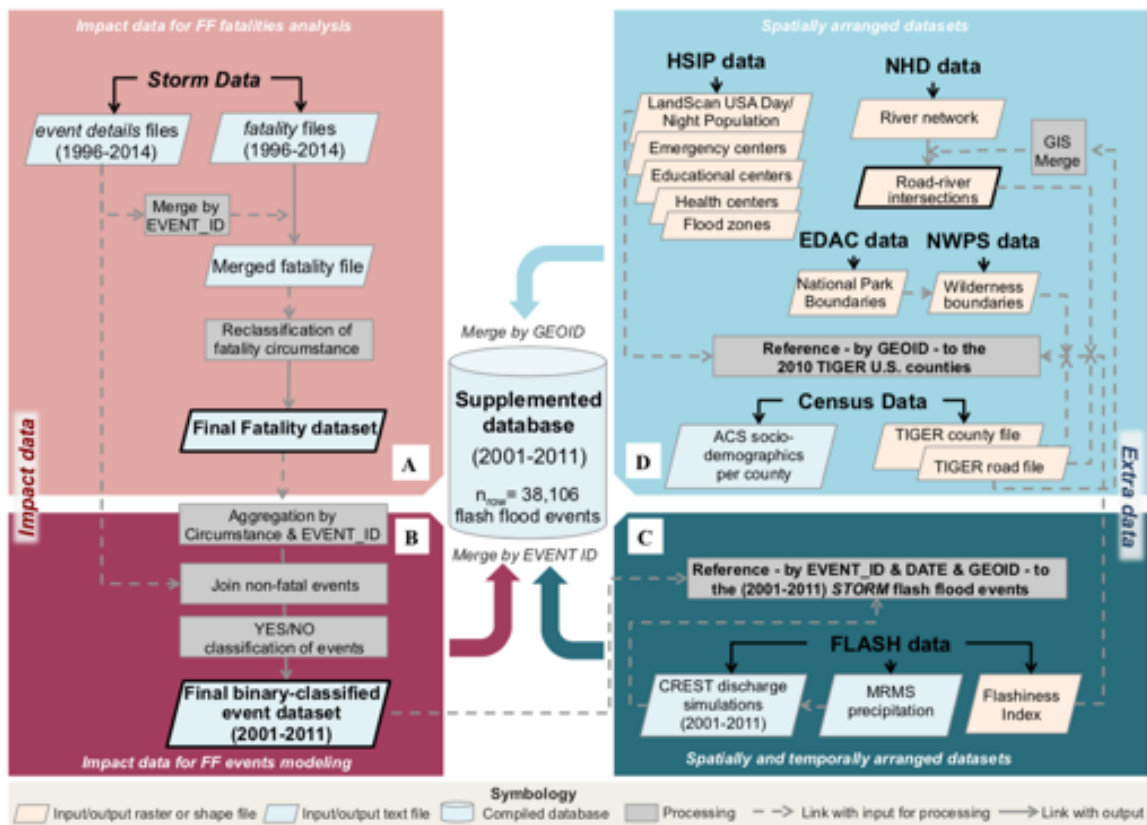


FIGURE 4.18 — Schéma récapitulatif du traitement des données. Les données additionnelles sont issues d'institutions nationales fournissant des données standardisées à l'échelle des Etats Unis : HSIP (Homeland Security Infrastructure Program), NHD (National Hydrography Dataset), EDAC (Earth Data Analysis Center), NWPS (National Wilderness Preservation System), Census (U.S. Census Bureau), TIGER (Topologically Integrated Geographic Encoding and Reference), FLASH (Flooded Locations and Simulated Hydrographs). Source : **Terti [2017]***

lement les populations selon l'horaire de la journée et le type de lieux fréquentés ?

- Comment prendre en compte l'interaction entre les dynamiques de mobilité socio-spatiales infra-journalières et l'évolution des circonstances hydro-météoro-logiques lors de crues éclair localisées ?

Nous avons focalisé notre attention sur la prédiction de décès (un ou plusieurs) associés à l'utilisation d'un véhicule (VE) car la fréquence de ces cas parmi l'ensemble des événements de crues rapides considérés (incluant les événements fatals et les non-fatals) permet une approche statistique robuste. Même si les données du Storm data s'étaient sur une période de 19 ans (1996-2014), nous avons dû restreindre la taille de l'échantillon de cas pris en compte à 10 ans de données (2001-2011) du fait de la seule disponibilité des données de réanalyse des précipitations radar et des sorties de modèles hydrologiques sur cette période plus limitée. La figure 4.18 résume la démarche de

construction de la base de données.

Ainsi, un total de 385 événements de crues rapides mortelles survenues aux États-Unis de 2001 à 2011, cumulant 551 décès classés par circonstance d'accident, a été pris en compte. Bien que l'échantillon soit presque deux fois plus réduit que celui de départ, il présente une distribution similaire des circonstances de décès, dominées par les accidents liés aux véhicules. A ces 385 événements ont été ajoutés l'ensemble des événements de crues non mortels de la même période, soit un total de 38 106 événements sur la période d'étude de 10 ans.

En termes de résolution spatiale, les données du Storm data étant inégales avant et après 2006, date à laquelle un effort a été fait pour utiliser les polygones d'alerte plutôt que la surface totale du comté pour l'enregistrement des données, nous avons choisi de travailler à la résolution spatiale du comté. Sur la période de référence, 2899 comtés, soit 93% des comtés des États Unis, ont subis au moins un événement de crue soudaine, la moyenne se situant à 13 cas/comté et un maximum de 224 événements pour les comtés les plus exposés comme, par exemple, ceux du centre du Texas [**Terti et al. 2019a**]*. Parmi ces cas, 259 événements de crues rapides ont impliqué des accidents mortels liés à l'usage de véhicule (VE) dans 204 comtés.

Pour compléter cette base de données par des variables permettant de quantifier les principaux facteurs de vulnérabilité influençant l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation des personnes lors de crues soudaines, selon l'approche conceptuelle détaillée précédemment et décrite plus précisément dans **Terti et al. [2015]***, nous avons étudié l'ensemble des données disponibles à la résolution du comté sur l'ensemble des États-Unis. Bien entendu aucune enquête ou ensemble de données à grande échelle n'est disponible pour fournir directement des informations actualisées sur le niveau de conscience des risques de crues soudaines ou sur la capacité de réponse de la population exposée à l'échelle des États-Unis. Au lieu de cela, une importante revue de littérature, nous a permis d'identifier parmi les données disponibles une série d'indicateurs pouvant servir à quantifier la vulnérabilité et le risque humain pendant les crues soudaines. Au total près de 13 bases de données différentes ont été moissonnées pour fournir des indicateurs liés aux réponses hydrologiques et météorologiques, aux caractéristiques géomorphologiques, aux moyens de gestion de crise disponibles, et à d'autres attributs spatiaux et socio-démographiques. Le plus compliqué a été d'intégrer des données produites à différentes échelles et/ou résolutions spatiales et temporelles, et exprimées dans des unités variées demandant d'homogénéiser les unités afin de permettre le couplage entre données de différentes natures.

Sans rentrer dans le détail de la longue liste des 400 variables collectées, par ailleurs largement décrites dans **Terti *et al.* [2019a]***, nous avons en particulier cherché à coupler certaines variables pour représenter les concomitances potentiellement critiques entre pics de crue et affluence sur les routes. Par exemple, nous avons combiné les indicateurs représentant l'heure de survenance de la crue soudaine et l'heure d'arrivée au travail pour créer un nouvel indicateur appelé "navetteurs". Ainsi, sur la base de l'heure simulée du pic de crue pour un événement donné, chaque événement de la base de données s'est vu attribué un créneau horaire de 30 minutes auquel a pu être associé le nombre de navetteurs du comté concerné arrivés au travail pendant ce même créneau horaire. Cette nouvelle variable permet ainsi une représentation plus réaliste de la variabilité du nombre de personnes exposées dans les véhicules à l'occasion de leurs déplacements habituels, reconnus comme l'une des causes majeures d'accidents lors de crues rapides.

La dernière étape de préparation des données avant la modélisation a été de classer chaque enregistrement de crue rapide selon 2 catégories séparant les événements n'ayant pas fait de victime liée au véhicule (NO-EVENT) de ceux ayant fait au moins une victime pour cette circonstance spécifique (EVENT). Cela permet d'obtenir un ensemble de données classées de façon binaire afin de tester l'influence de variables prédictives sur l'occurrence ou non de pertes humaines associées à la circonstance VE.

4.2.4 Prédiction probabiliste du risque de décès sur la route lors de crues soudaines

Méthode de classification par forêt aléatoire

Nous avons utilisé pour cette analyse l'algorithme d'apprentissage par machine basé sur l'arbre de décision pour la classification et la régression appelé "forêt aléatoire" (RF) Breiman [2001]. Ce type de modèle divise récursivement l'espace de données en sous-espaces selon le comportement d'une variable cible. La succession de divisions binaires conduit à un ensemble de branches d'arbre subdivisant l'espace de données en partitions disjointes de la variable cible. Les divisions sont sélectionnées pour maximiser l'homogénéité ou la pureté de la variable cible dans les noeuds terminaux de l'arbre. Comparé à d'autres approches statistiques avancées telles que la régression logistique, l'algorithme de la forêt aléatoire ne repose sur aucune relation linéaire entre les variables prédictives d'entrée et la variable cible, et il n'est pas sensible aux valeurs

aberrantes, étant capable de traiter des interactions non linéaires et complexes d'ordre élevé.

Le principe des forêts aléatoires est la randomisation qui s'applique à deux niveaux : i) chaque arbre de la forêt d'ensemble est construit à partir d'un nouvel échantillon d'entraînement tiré au hasard avec remplacement (c'est-à-dire un échantillon bootstrap) à partir des N cas de l'ensemble d'entraînement initial (X, Y) , et ii) la division de chaque nœud pendant la construction de l'arbre est la meilleure division d'un sous-ensemble aléatoire de toutes les variables. En raison du caractère aléatoire inhérent, les arbres individuels sont presque indépendants. Comme la forêt est construite sur des données d'entraînement, chaque arbre est testé sur les échantillons non utilisés pour la construction de cet arbre. Comme pour un ensemble de validation, les prédictions sur les données non incluses dans l'échantillon bootstrap (appelé "échantillon hors sac" ou OOB) sont agrégées et le taux d'erreur est ainsi estimé (erreur OOB). Les prédictions des arbres de la forêt finale sont agrégées à l'aide d'un ensemble de données indépendant de l'échantillon d'entraînement. Chaque arbre fournit, par exemple, une classification pour chaque nouvel événement de crue éclair en fonction de l'endroit où il atterrit dans l'arbre. À la fin, l'algorithme de la forêt aléatoire conserve la classification ayant obtenu le plus grand nombre de votes (sur tous les arbres de la forêt). Les probabilités d'un décès lié à un véhicule sont calculées à partir du nombre total de votes.

Avant de procéder à la modélisation par forêt aléatoire, une première étape a consisté à réduire le nombre de variables prédictives à tester de 41 (issue de la sélection et la combinaison entre les 400 variables initialement moissonnées dans les bases de données de fournisseurs variés) à 9 en mesurant la redondance entre variables par des tests de corrélation.

Parmi les 38 048 événements de crues rapides constituant l'ensemble des données, 28 536 observations ont été sélectionnées au hasard pour fournir l'ensemble d'entraînement du modèle. Les 25% restants constituent l'ensemble de test distinct, utilisé uniquement pour évaluer la performance de prédiction du modèle final. L'algorithme combine cinq variables, choisies au hasard parmi les neuf variables prédictives, pour identifier le meilleur séparateur dans chaque nœud. Le modèle optimal de prédiction est choisi de manière à maximiser l'aire sous la courbe (AUC) ROC qui trace le taux de vrais positifs (prédiction correcte de la classe positive c.a.d EVENT) en fonction des faux positifs (prédiction incorrecte de la classe positive c.a.d EVENT). La performance du modèle ainsi établi est de $AUC = 0,7$ (un modèle aléatoire correspondrait à

un AUC de 0,5). Sur cette base, un test de Gini est utilisé pour mesurer l'importance de chaque variable prédictive de l'arbre final. Il ressort de cette analyse que le débit spécifique journalier, la durée du maximum de précipitation, l'indice de "flashiness"¹⁰, la surface de la zone inondable à haut risque, le nombre d'intersection route-rivière et la variable "navetteurs" apparaissent avoir le plus fort pouvoir prédictif.

Application du modèle prédictif sur les cas de crues de mai 2015 au Texas et en Oklahoma

Le 14 mai 2015, avant les inondations importantes qui ont commencé aux alentours du 24 mai, des alertes de crues éclair ont été émises pour les comtés du sud-est du Texas. Au moins 34 personnes ont perdu la vie lors des crues éclair du 6 au 29 mai, dont 30 victimes au Texas et quatre en Oklahoma. Quatre-vingt-huit pour cent de ces décès se sont produits du 18 au 29 mai, et plus 50% d'entre eux sont survenus dans des circonstances liées aux véhicules. Les services de secours ont effectué des centaines de sauvetages impliquant principalement des automobilistes en détresse qui tentaient de traverser des zones de hautes eaux.

Le modèle de prédiction précédemment décrit a été appliqué pour chaque jour à partir du 16 mai pour calculer quotidiennement les probabilités de la classe "EVENT", fournissant une évaluation probabiliste du risque humain lié au véhicule dans chaque comté américain. Les probabilités estimées sont distribuées en quatre classes de risque : i) faible $\leq 0,25$, ii) modéré =]0,25 - 0,5], iii) fort]0,5 - 0,75], et iv) très fort $> 0,75$. La figure 4.19a présente la distribution spatiale des niveaux de risque issus de la modélisation pour la journée du 26 mai comparés à la distribution :

- des comtés ayant à déplorer des décès par véhicule répertoriés dans la base de données Storm data (limite de comté surlignée de contour rouge),
- d'incidents survenus pendant la crise (inondations/fermeture de routes, sauvetages...) répertoriés dans les rapports préliminaires publiés en temps quasi réel par les services locaux de prévision du NWS (points rouges).

Pour préciser le niveau de risque prévu au pas de temps horaire pour cette même journée du 26 mai, le modèle a également été appliqué en forçant le classificateur

¹⁰Indicateur de la sévérité des crues rapides défini par [Saharia *et al.* 2017] comme la différence entre le débit de pointe et le débit de débordement divisé par le temps de montée de la crue et la superficie du bassin.

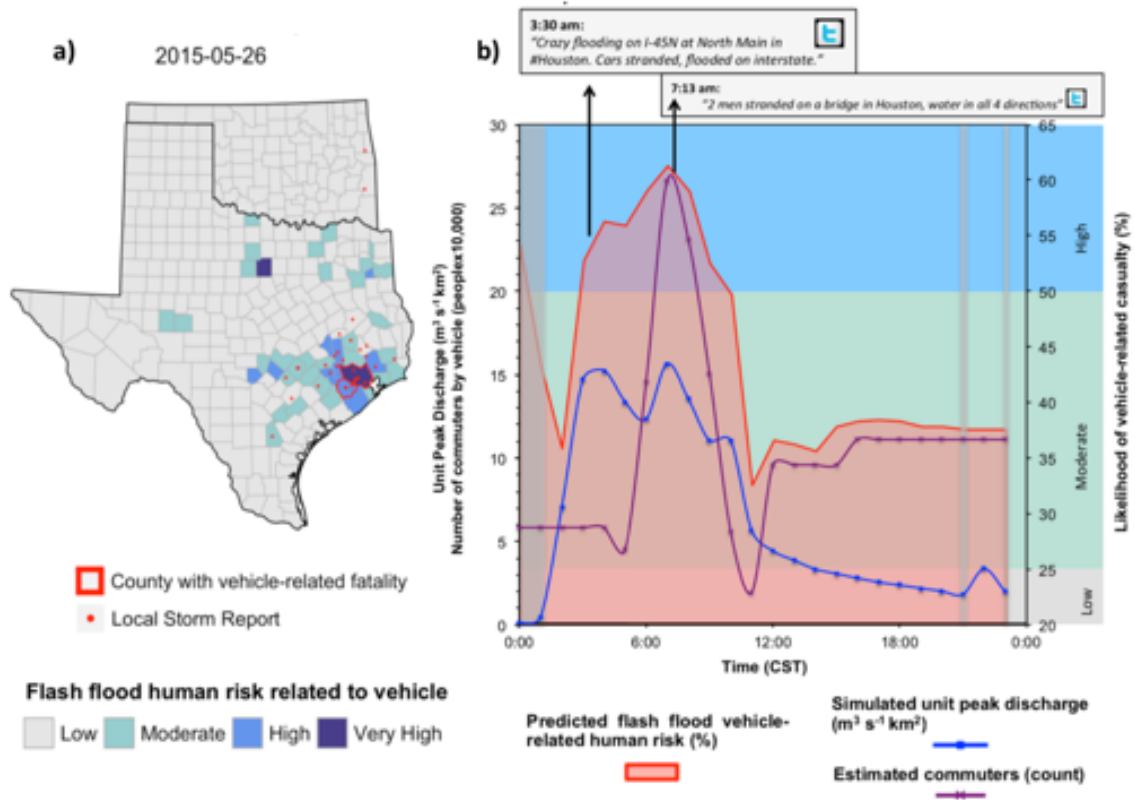


FIGURE 4.19 — a) Distribution spatiale des niveaux de risque issus de la modélisation pour la journée du 26 mai dans les états du Texas et de l'Oklahoma ; b) Distribution horaire de l'indicateur de risque dans le comté de Harris où 4 décès liés aux véhicules sont à déplorer. Source : Terti [2017]*

Random-Forest avec des simulations horaires de débit spécifique de pointe et le nombre de navetteurs/heure calculé sur la base de l'heure estimé du pic de crue dans chaque comté. La figure 4.19b montre la distribution horaire de l'indicateur de risque dans le comté de Harris où quatre décès liés aux véhicules sont à déplorer.

Sur la base de ces résultats, il semble que ce type de modèle puisse apporter une précision quand au risque d'occurrence de décès lié à la mobilité quotidienne lors de crue rapide. Il est évident que la résolution spatiale des données représentant soit le débit de crue spécifique maximum simulé à l'échelle du comté, soit les flux d'utilisateurs de la route est une limite forte de ce modèle qui ne permet pas, au contraire de MoBRISK, d'envisager la localisation précise des risques d'accidents routiers. Néanmoins ce modèle a l'avantage d'être utilisable dans le cadre d'une prévision opérationnelle des impacts. Dans ce cadre, on peut se demander si la précision spatiale et temporelle des sorties de modèles d'impacts ou la nature probabiliste versus déterministe de la prévision joue un rôle en matière de prise de décision de protection, que ce soit au niveau des gestionnaires de crise ou des populations exposées.

Si de plus en plus de services météorologiques nationaux dans le monde s'orientent vers le développement d' "impact-based forecast" dans l'objectif de combler le fossé entre qualité de la prévision et qualité de la réponse sociale, l'efficacité d'une information ciblée sur les impacts potentiels n'est pas encore clairement établie [WMO 2015]. Cette question s'est posée dans le cadre du projet Européen ANYWHERE visant le développement d'un système d'information à destination des gestionnaires de crise. Pour tenter d'y répondre, j'ai coordonné le travail d'une équipe interdisciplinaire impliquant des développeurs informatiques experts des modèles d'aléas et de risques, des prévisionnistes météo, des gestionnaires du risque et des scientifiques, dans le but de développer le jeu ANYCaRE (ANYwhere Crisis and Risk Experiment) détaillé dans la section suivante.

4.3 ANYCaRE : Un jeu sérieux pour comprendre les enjeux scientifiques, opérationnels et communicationnels de la gestion de crise

ENCADREMENTS : Post-Doctorat de Galateia Terti (2017-2018).

COLLABORATEURS : A. Cangròs i Alonso (Catalan Water Agency, Spain), M. Kalas (KAJO compagny, Slovakia), I. Lång (Finnish Meteorological Institute, Finland), V. Lorini (EU Joint Research Center, Italy), T. Sabbatini (KAJO), A. Scolobig (University of Geneva, Switzerland), P. Weyrich (Swiss Federal Institute of Technology-ETH Zurich, Switzerland).

PROGRAMME DE RECHERCHE : H2020 ANYWHERE (WP5.1)

PUBLICATIONS : Terti *et al.* [2019b], Weyrich *et al.* [2020], Gebhardt *et al.* [2017]*

L'objectif premier de ce jeu était de favoriser la co-construction d'outils d'aide à la gestion de crise entre les différents acteurs du projet venant soit de la sphère scientifique (développeurs de modèles d'aléas et de risques), soit de la sphère opérationnelle (protection civile, gestionnaires du risque). L'idée de base a donc été de faire jouer ses différents acteurs le rôle des gestionnaires de crise ou des prévisionnistes chargés d'interpréter les sorties de modèles afin que chacun puisse appréhender les problématiques de la prise de décision du point de vue de l'autre. Néanmoins, un deuxième objectif consistait également à tester l'effet de différents types d'information sur la prise de décision en situation d'urgence liée à une crise hydro-météorologique.

4.3.1 Concept

ANYCaRE est un jeu sérieux qui engage les participants dans le processus de prise de décision pour la gestion d'une crise hydro-météorologique réaliste et complexe. L'expérience consiste à faire jouer un public d'adultes en attribuant aux participants un rôle dans la gestion d'une situation d'urgence simulée sur la base d'un scénario plausible. Le jeu reproduit les étapes de la prise de décision dans le contexte d'une cellule de crise sur la base de l'apport progressif d'informations de différentes natures (prévisions hydro-météorologiques, cartographie prévisionnelle des impacts, dommages observés), issues de différentes sources (officielles et non officielles) et présentant un degré d'incertitude et de précision spatiale et temporelle variés. A partir de ces informations les joueurs doivent alors décider de manière collégiale de la mise en oeuvre (ou non) d'actions de mise en protection et de communication envers la population qu'ils ont la charge de protéger.

Un avantage important de l'approche par simulation est sa nature dynamique qui permet aux participants d'expérimenter des décisions en temps réel et d'en constater les effets au fil du temps [Pasin et Giroux 2011]. En fournissant d'abord aux joueurs des prévisions en matière d'aléa uniquement, puis en ajoutant des prévisions du risque (incluant les composantes exposition et vulnérabilité) et des observations d'impact issues des réseaux sociaux à chaque tour du jeu, elle leur permet d'envisager l'utilité de ces informations pour soutenir le processus de prise de décision collective en cas d'urgence. Ce processus "d'apprentissage par la pratique" - un principe fondamental de la théorie de l'apprentissage par l'expérience [Kolb 1984] - a l'avantage de se dérouler dans un cadre informel sans conséquences néfastes pour les participants.

D'après le recensement des jeux sérieux effectué par [Solinska-Nowak *et al.* 2018], si le jeu ANYCaRE entre dans la catégorie la plus courante des jeux sérieux multi-joueurs impliquant des interactions en face à face entre les joueurs, il vient combler un manque car rares sont les jeux de rôle traitant des systèmes d'alerte précoce qui permettent de tester de nouveaux produits de prévision ou d'autres modes d'alerte informelle.

4.3.2 Principes et règles du jeu

La description des rôles à jouer et les options décisionnelles parmi lesquelles les joueurs doivent choisir ont été construites sur la base d'entretiens avec les acteurs opérationnels

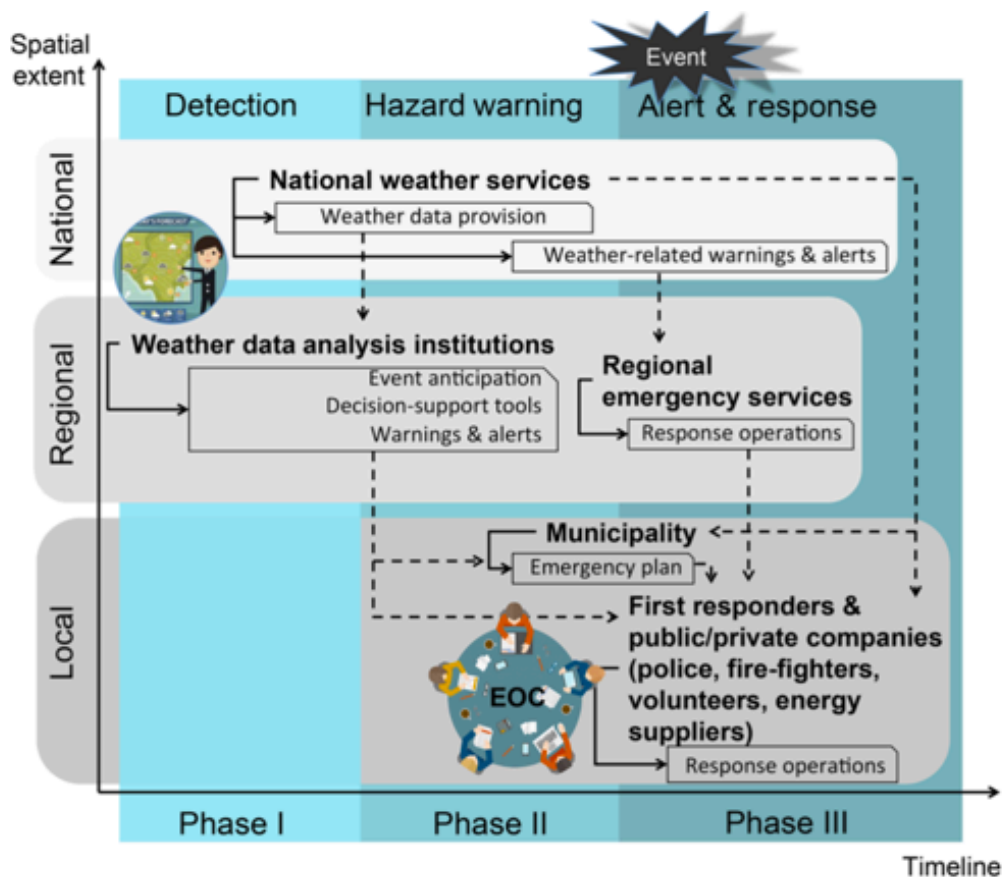


FIGURE 4.20 — Cadre conceptuel des systèmes d'alerte météorologiques européens adopté pour la conception du jeu de rôle ANYCaRE. Les flèches en pointillés illustrent le flux d'informations entre les acteurs nationaux, régionaux et locaux. Source : **Terti et al. [2019b]*** Adapté d'après **[Gebhardt et al. 2017]**

de différents pays mobilisés dans le cadre du projet ANYWHERE **[Gebhardt et al. 2017]** ainsi que par des observations menées en cellule de crise dans le contexte de l'événement de crues rapides survenu en septembre 2005 dans le Gard **[Ruin 2007b]**. Le jeu a ainsi été conçu de manière à être adapté ou facilement adaptable aux contextes d'alerte et de prise de décision en cas d'urgence dans la plupart des pays européens.

Sur la base d'exemples de systèmes d'alerte provenant des sites pilotes d'ANYWHERE, comme la Suisse (canton de Berne), l'Espagne (Catalogne), l'Italie (Ligurie), la Finlande (Savo Sud) et la France (Corse), les points communs de ces systèmes ont été identifiés et utilisés pour simuler de manière réaliste la dynamique des processus d'alerte et de réponse (Figure 4.20). Ces systèmes d'alerte vont de la détection d'une menace potentielle liée aux conditions météorologiques aux décisions relatives à la coordination de la réponse d'urgence. En cas d'urgence, des acteurs aux compétences complémentaires sont réunis (au niveau administratif concerné : local, régional ou national en cas d'urgence d'État), physiquement ou à distance, pour prendre des décisions

sur la meilleure façon de gérer la crise afin d'assurer la sécurité des personnes. En général, ces centres d'opérations d'urgence comprennent des représentants des services de prévision, des forces de l'ordre, de la sécurité civile, des représentants des municipalités, et des experts en infrastructures d'entreprises publiques ou privées (routes, télécommunications, fournisseurs d'énergie). Un représentant de la plus haute autorité concernée coordonne les discussions et prend la responsabilité des décisions finales. Le centre fonctionne comme le noyau de l'information, en recevant, vérifiant et partageant les informations avec les équipes opérationnelles ainsi qu'en décidant des actions d'urgence complexes qui nécessitent une vue d'ensemble de la situation, en coordonnant les efforts et en communiquant avec le public.

Basé sur ce type d'organisation de gestion de crise standard à l'échelle de l'Europe, le jeu ANYCaRE propose que les décisions soient prises dans le cadre d'une cellule de crise rassemblant les différents acteurs dans une même salle ou de manière virtuelle. Les rôles à répartir entre les joueurs (au hasard ou en fonction de leur expertise réelle) décrit les tâches et responsabilités que chaque joueur doit assumer pour contribuer à la décision collective finalisée par le responsable de la cellule de crise.

Le rôle de la cellule de gestion de crise est d'assurer la sécurité de la population en coordonnant les actions de protection lorsque le cours normal des activités quotidiennes est menacé ou gravement perturbé par un événement indésirable. Les situations de crise sont dominées par l'incertitude et la multiplication de problèmes délicats à résoudre sous la pression du temps. En tant que groupe, les acteurs sont invités (i) à évaluer la situation et la menace potentielle sur la base des prévisions hydro-météorologiques et de leur propre évaluation du niveau d'exposition, éventuellement étayée par des prévisions d'impacts et des informations issues des médias sociaux, (ii) à sélectionner, à partir d'une liste préétablie, les actions de protection (le cas échéant) et quatre options de communication qui peuvent être prises pour informer au mieux le public visé de ces décisions. La liste d'actions proposée dépend du scénario et de l'objectif visé et peut être facilement adaptée à différents scénarios à jouer par différents publics.

Plusieurs tours (jusqu'à 3 ou 4) de prise de décision sont joués successivement pour simuler la progression du danger depuis sa détection précoce jusqu'à sa réalisation. En utilisant plusieurs tours, nous permettons aux joueurs de se familiariser progressivement avec le contexte de la prise de décision en situation d'urgence et de tester différents outils d'aide à la décision, qui donnent des informations de plus en plus précises, à mesure que l'événement se rapproche. La répétition du processus décisionnel sur

plusieurs tours aide également les joueurs à mieux gérer leur rôle et à tirer des enseignements de la pratique. Néanmoins, en fonction de la dynamique et de la prévisibilité de l'événement simulé, le rythme de succession des informations et des décisions à prendre dans le jeu peut varier pour représenter quelques heures à quelques jours dans la vie réelle.

Au début de la simulation, seules les prévisions basées sur des modèles météorologiques et/ou hydrologiques sont disponibles pour les heures ou les jours à venir. Le niveau d'incertitude est encore élevé. Au fur et à mesure des tours de jeu, des informations plus précises, y compris des informations basées sur l'impact, sont fournies pour refléter la diminution de l'incertitude et l'imminence potentielle de la survenance de l'événement. Grâce à ces informations, distribuées spécifiquement à chaque rôle en fonction de ses propres responsabilités, les acteurs doivent d'abord interpréter et partager leurs connaissances spécifiques avant d'envisager et de décider des solutions à utiliser pour protéger les populations exposées. Sur la base d'une évaluation collective de la situation, les joueurs disposent d'un temps limité pour choisir parmi 3 grands types de décisions qui conduiront à des actions précises sur le terrain : (i) se tenir au courant et surveiller la situation, (ii) activer la cellule de crise pour prendre des mesures de précaution, (iii) activer le plan d'urgence et procéder à des mesures de sécurité spécifiques. Afin de simuler l'urgence de la prise de décision, le modérateur du jeu veille à faire pression sur le groupe à chaque tour de jeu pour obtenir leurs décisions en temps limité.

4.3.3 Le scénario pluies-inondations

La mise en œuvre initiale de ANYCaRE a commencé par un scénario d'inondation/crue rapide se déroulant sur un territoire virtuel composé de 3 zones distinctes caractérisées par des susceptibilités diverses en termes d'aléas et d'exposition (zones urbaines et résidentielles, camping, écoles, pont principal, festival d'automne réunissant habitants et touristes) (Figure 4.21a).

Chaque acteur se voit attribuer un rôle spécifique pour agir en tant que représentant de l'une des institutions suivantes : (i) les services de prévision hydro-météorologiques, qui interprètent les résultats des modèles et proposent des niveaux d'avertissement (code couleur) ; (ii) les services de sécurité civile, qui s'occupent de l'évacuation éventuelle des résidences, des écoles, des campings et des manifestations publiques ; (iii) la municipalité, qui prend les décisions relatives au fonctionnement quotidien (par

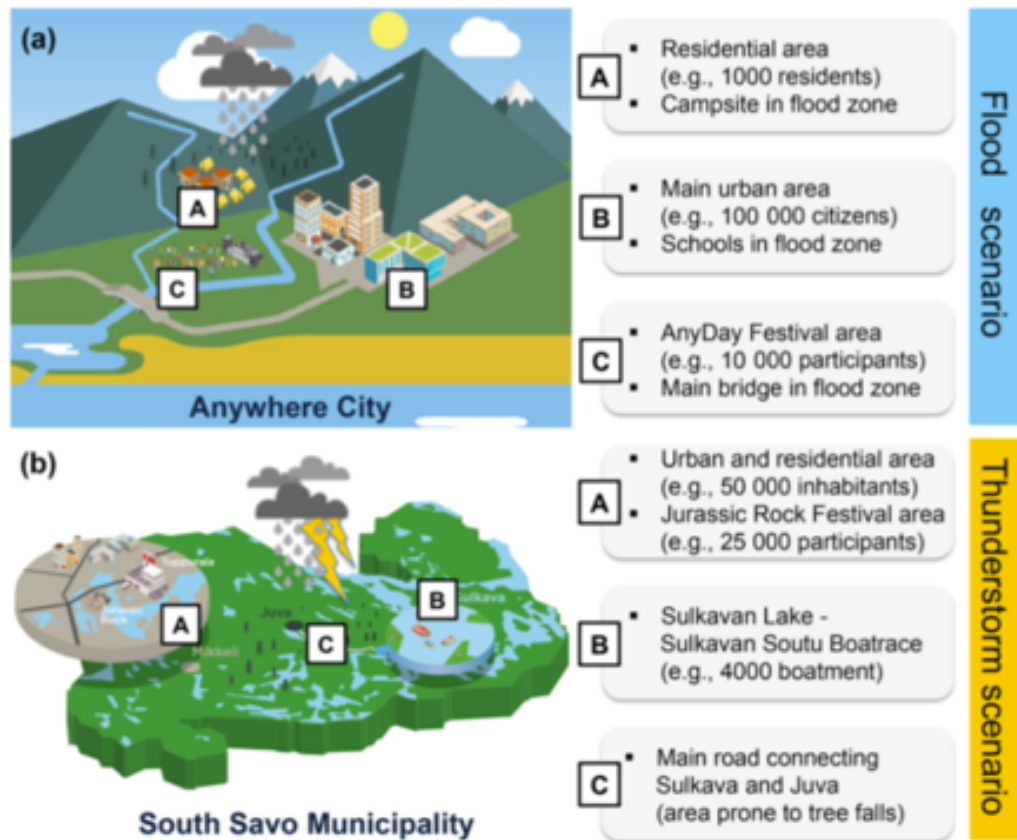


FIGURE 4.21 — Présentation et brève description du territoire considéré dans les scénarios ANYCaRE (a) scénario pluies-inondations et (b) scénario orages-vents violents. Source : **Terti et al. [2019b]***

exemple, l’annulation des transports scolaires et la fermeture des écoles) ou aux événements récréatifs (par exemple, annulation de festival) dans la ville ; (iv) les services routiers, qui gèrent les fermetures et l’entretien des routes et des ouvrages de franchissement des cours d’eau.

Le jeu se déroule au début de l’automne et commence un lundi, 5 jours avant le festival AnyDay qui se déroule au bord de la rivière principale. Le pic du festival est prévu pour le samedi avec un nombre de visiteurs prévu estimé à 10 000 personnes. Le scénario d’inondation se déroule en 3 tours (1 tour par jour du mercredi au vendredi, le jour précédant le festival)(Figure 4.22a). Chaque tour est divisé en deux essais, le premier où seules les prévisions hydro-météorologiques traditionnelles sont fournies et le second où de nouveaux outils de prévision/signalement des impacts développés dans le cadre du projet ANYWHERE sont également fournis. A chaque essai, des décisions collectives doivent être prises et assorties d’une évaluation du niveau de confiance dans les décisions choisies (Figure 4.21a).

4.3.4 Le scénario orages-vents violents

Le scénario orages-vents violents a été construit sur la base du scénario d'inondation avec les ajustements nécessaires, à l'origine, pour une journée de formation combinée des services finlandais de protection civile, des météorologues et des employés de la compagnie d'électricité dans la municipalité de South Savo. Par conséquent, le territoire et les rôles du jeu ont été définis pour s'adapter à la zone d'étude.

La municipalité de South Savo possède un paysage particulier avec (i) des zones de forêts denses, (ii) des lignes électriques aériennes qui sont sensibles aux vents forts et à la chute des arbres, (iii) des zones lacustres qui attirent des adeptes des sports nautiques pendant l'été, et (iv) les zones urbaines de Mikkeli et Juva (Figure 4.21b). Comme dans le scénario d'inondation initial, trois zones distinctes présentant des caractéristiques spécifiques d'exposition et de vulnérabilité composent le territoire virtuel de jeu.

Les acteurs de ce scénario agissent en tant que (i) météorologues, qui interprètent les modèles nationaux de prévision météorologique et émettent des bulletins d'alerte ; (ii) services de protection civile, qui prennent des décisions pour l'évacuation éventuelle d'événements publics ponctuels ; (iii) compagnies d'électricité, qui gèrent la continuité des services de distribution d'électricité auprès de différents types de clients selon leurs contraintes économiques. Les représentants des compagnies d'électricité sont particulièrement sollicités pour répartir efficacement leurs ressources afin de remédier le plus rapidement possible aux éventuelles coupures de courant et assurer l'approvisionnement en électricité dans la région.

Compte tenu du développement rapide et du cycle de vie court des épisodes d'orages convectifs, le délai de prévision de ces phénomènes météorologiques est l'un des plus courts, ce qui constitue un véritable défi en matière de prévision. Ce scénario propose une simulation en trois tours de jeu condensés sur la temporalité virtuelle des 24h qui précèdent le festival (c'est-à-dire le tour 1 Jour J- 24h, le tour 2 J-6h, le tour 3 J-1h avant) dans le jeu ANYCARE (Figure 4.22b). Du point de vue météorologique, le scénario imite l'événement de vent violent dit "Asta" qui s'est produit en 2010 et a causé des pertes financières de plus de 20 millions d'euros [Astola *et al.* 2014]. Comme pour le scénario d'inondation, chaque cycle de jeu (tour) se compose de 2 essais pour permettre aux acteurs de comparer les outils existants aux nouveaux outils de prévision d'impacts. Dans ce scénario, les nouveaux outils ANYWHERE comprennent :

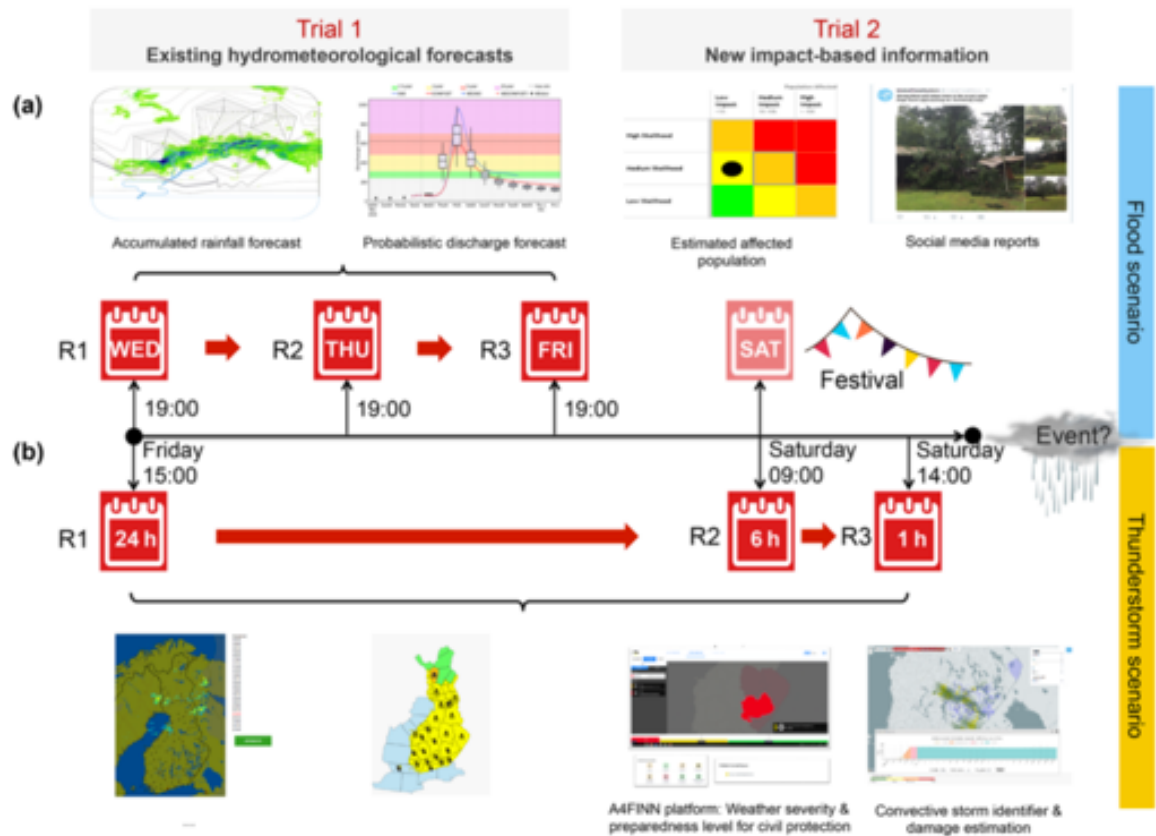


FIGURE 4.22 — Illustration schématique de la chronologie des cycles de jeux (tours 1 à 3) et des informations fournies aux joueurs de ANYCaRE pour le (a) scénario pluies-inondations et (b) le scénario orages-vents violents. Lors du deuxième essai de chaque tour, les joueurs reçoivent des outils supplémentaires d'aide à la décision, notamment des prévisions à haute résolution et des sorties de modèles d'impacts. Source : **Terti et al. [2019b]***

- l'A4FINN, un produit développé pour la municipalité de South Savo, qui combine des paramètres météorologiques pertinents et un produit cartographique permettant de suggérer par une procédure automatique le niveau de préparation adéquat à adopter par les services de protection civile ;
- un outil de prévision destiné à évaluer le taux de perturbation du réseau électrique et la durée de sa remise en fonctionnement.

4.3.5 Le scénario multirisque hybride Nat-tech

Dans le cadre de la présidence finlandaise de l'Union Européenne (UE) en 2019, un nouveau scénario plus complexe a été élaboré dans le but de susciter des discussions sur i) les différentes manières dont les États membres renforcent leur capacité et leur

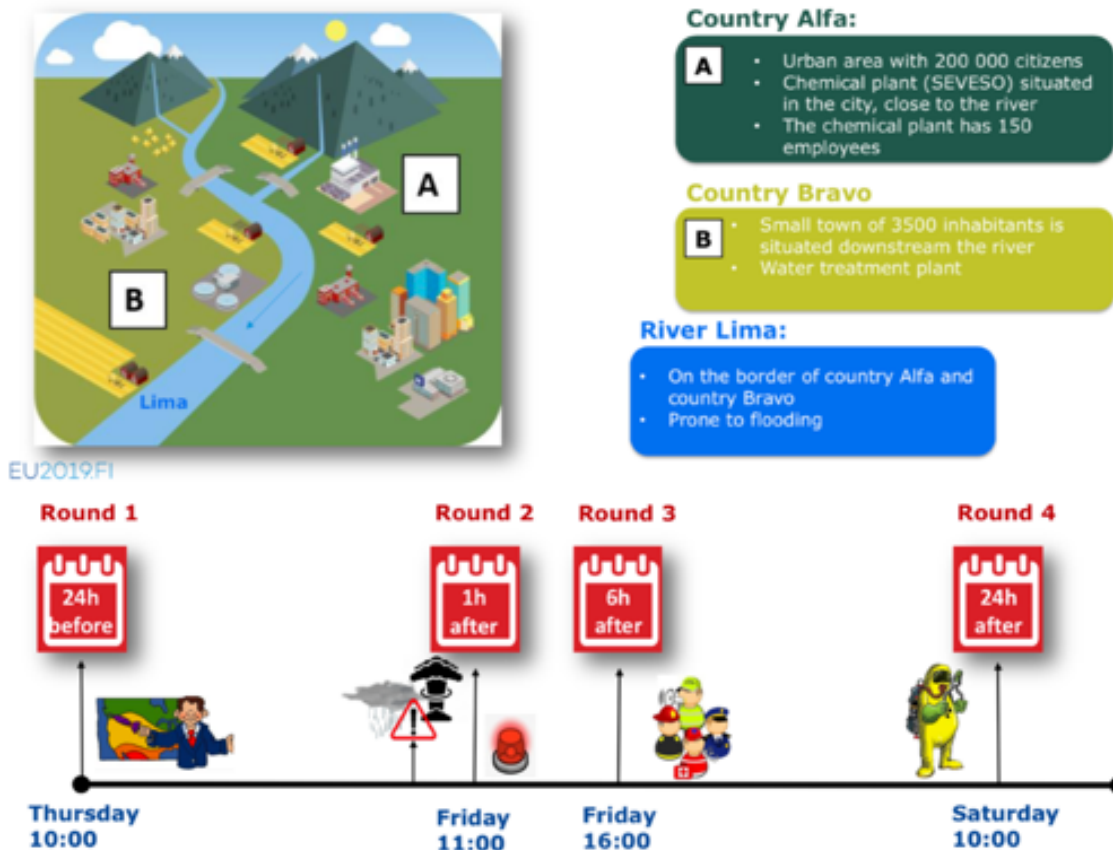


FIGURE 4.23 — Illustration schématique de la chronologie des cycles de jeux (tours 1 à 4) et du territoire considéré dans le scénario ANYCaRE multirisque hybride Nat-Tech.

résilience pour répondre à une variété de menaces émergentes et ii) les formes de coopération transversales et intersectorielles requises pour répondre aux menaces CBRN (chimiques, biologiques, radiologiques et nucléaires) et hybrides.

Sur la base de l'expérience des scénarios précédents et de l'opportunité offerte par l'atelier PROCIV (Groupe de travail sur la protection civile) de la présidence finlandaise de l'UE, l'équipe de finlandaise de l'UE, un scénario hybride multirisque impliquant des événements météorologiques extrêmes (inondations et vents violents) qui ont des effets en cascade entraînant une panne de courant prolongée, une explosion et un incendie dans une usine chimique déclenchant un rejet de produits chimiques et de substances radioactives. L'accident provoque également d'intenses discussions sur les médias sociaux, de la désinformation et la propagation de rumeurs. Une partie de cette activité pourrait être liée à une intention malveillante (= influence hybride possible) visant à affaiblir la confiance dans les autorités.

Le scénario se déroule quelque part en Europe, à la frontière de deux pays, Alfa

et Bravo. La région est géographiquement sujette aux inondations. La rivière Lima coule à la frontière des pays Alfa et Bravo. Le territoire du pays Alfa comprend une importante zone urbaine très peuplée ainsi qu'une usine chimique, située dans une zone inondable, qui utilise des quantités importantes de substances dangereuses. De l'autre côté de la rivière limitrophe, une ville plus petite et sa station de traitement d'eau potable se trouvent dans le pays Bravo (Figure 4.23).

Les acteurs de ce scénario multirisque et trans-frontalier agissent soit comme représentant des : (i) services hydro-météorologiques, qui interprètent les résultats de modèles d'aléas et communiquent des alertes si nécessaire ; (ii) services de protection civile locaux/régionaux du pays Alfa, qui sont chargés de surveiller, d'évaluer et de réagir à la situation locale et de la communiquer aux autorités nationales ; (iii) les autorités nationales de protection civile du pays Alfa et Bravo, qui sont chargées de la coopération intersectorielle entre les autorités nationales et qui peuvent demander une assistance ou activer le mécanisme de protection civile de l'Union européenne ; (iv) un coordinateur de la cellule de crise chargé d'organiser des briefings sur la situation à chaque tour et de faciliter le processus de prise de décision dans un délai limité.

Le scénario commence un jeudi, 24 heures avant l'événement météorologique extrême prévu (fortes pluies et vents violents). Le deuxième tour commence le vendredi à 11h, une heure après l'explosion de l'usine chimique. Le troisième tour a lieu 6 heures après l'accident et le quatrième tour 24 heures plus tard. Les objectifs de l'atelier PRO-CIV étant de déclencher des discussions sur la coopération intersectorielle et le mécanisme de protection civile de l'UE pour faire face aux menaces CBRN et hybrides, 4 tours ont été nécessaires pour mettre en place un scénario aussi complexe et en cascade qui vu le temps de jeu imparti n'a permis qu'un seul essai par tour.

4.3.6 Les leçons tirées de l'implémentation des différentes versions du jeu

Le premier test de l'expérimentation d'ANYCaRE utilisant le scénario d'inondation a été mené lors du deuxième atelier ANYWHERE à Helsinki (septembre 2017) avec 16 acteurs composés principalement de scientifiques experts en modélisation des aléas météorologiques, de prévisionnistes opérationnels et de gestionnaires de situations d'urgence. Depuis lors, sur la base des retours d'expérience obtenus à Helsinki, une autre session de jeu testant une version améliorée a eu lieu à Grenoble en janvier 2018

entre 8 membres du projet ANYWHERE. Cette dernière version du scénario pluies-inondations a ensuite été utilisée à trois autres occasions, deux fois avec des étudiants de l'université de Grenoble (avril 2018 et mai 2019) et une fois avec 16 experts participant au troisième atelier ANYWHERE à Barcelone. Un article scientifique décrivant les différentes étapes de la conception et de la mise en œuvre du jeu ainsi que les enseignements tirés a été tiré de ces expérimentations [Terti *et al.* 2019b].

En parallèle, la version du jeu de scénario d'inondation a également été adaptée par des chercheurs de l'UTH Zurich en collaboration avec les développeurs d'ANYCaRE pour simuler et tester la manière dont les informations publiques provenant des médias sociaux sont utilisées dans les centres d'opérations d'urgence pour prendre des décisions (de protection et de communication). Quatre sessions du jeu ont impliqué un total de 20 participants inscrits à un cours de formation avancée à l'Université de Genève, le CERG-C. Les participants au CERG-C sont des praticiens ou de jeunes scientifiques qui travaillent dans la gestion des risques de catastrophes dans différents pays du monde. Ces expériences et leurs résultats sont décrits en détail dans un article scientifique récemment soumis à l'International Journal of Disaster Risk Reduction [Weyrich *et al.* 2020].

Le scénario orages-vents violents a été joué à Mikkeli (Finlande) en mai 2018 dans le cadre de la formation du site pilote ANYWHERE. Le but de cette session de jeu était de former la protection civile de la région de l'Est de la Finlande, le personnel de la compagnie d'électricité Järvi-Suomen Energia et les prévisionnistes de l'institut de météorologie finlandais (FMI) à se familiariser avec les outils ANYWHERE et à tester leur facilité d'utilisation par la simulation d'une crise météorologique virtuelle. Cette expérience et ses principaux résultats sont également décrits en détail dans [Terti *et al.* 2019b].

Enfin, le scénario d'événements en cascade multirisques a été testé à deux reprises en juillet 2019 avant d'être joué lors de 5 sessions parallèles lors de l'atelier PROCIV de la présidence finlandaise de l'Union Européenne à Helsinki le 22 juillet. Au total, environ 80 délégués des États participants de l'UE ont participé activement au jeu.

Toutes ces sessions de jeu ont été suivies de débriefings au cours desquels les joueurs ont pu donner leur avis sur leur vécu lors de cette expérience, ce qu'ils y avaient appris et leurs appréciations et propositions d'amélioration des outils d'aide à la décision utilisés pendant le jeu. Les expériences ont été considérées comme réussies puisque le jeu a été jugé "représentatif de la réalité de la gestion de crise" par

les joueurs qui avaient l'expérience d'une telle situation (par exemple les participants à l'atelier PROCIV) et "a clairement démontré l'avantage de certains produits". Les principaux enseignements tirés de ces expériences sont les suivants :

- les expériences ont révélé l'importance de certains rôles dans la chaîne de décision et ont enseigné l'importance de la coopération entre de multiples acteurs pour une résolution efficace des problèmes [Terti *et al.* 2019b] ;
- les praticiens de la protection civile ont exprimé leur fort intérêt à appliquer ce type d'outil dans leur environnement professionnel et notamment comme un outil pertinent de formation des personnels [Terti *et al.* 2019b] ;
- les modèles de prévision des impacts se sont révélés utiles pour augmenter le niveau de confiance dans les décisions de gestion des urgences [Terti *et al.* 2019b] ;
- les informations issues des médias sociaux permettent de prendre de meilleures décisions et augmentent le niveau de confiance associé [Weyrich *et al.* 2020] ;
- les informations fournies par les observateurs météorologiques, c'est-à-dire les personnes formées en météorologie, sont plus fiables que les informations provenant du grand public, indépendamment de la qualité de l'information [Weyrich *et al.* 2020].

En conclusion, il faut souligner que le jeu ANYCaRE semble avoir répondu à un besoin car il a déjà reçu plus d'attention et a été utilisé bien au delà de nos attentes initiales. Pour répondre aux demandes externes, d'autres sessions de jeu ont été organisées en septembre 2019 dans le cadre du workshop sur les extrêmes et les transitions énergétiques organisé par le UE Joint Research Center de sur le site d'Ispra en Italie, ainsi qu'à l'école d'ingénieurs Grenoble INP. Une autre adaptation du jeu devrait voir le jour en 2020 pour répondre aux besoins de formation de Des enseignants de l'Ecole Nationale de la Météorologie de Toulouse ont également manifesté leur intérêt pour adapter et tester ce jeu dans le cadre de la formation des prévisionnistes de Météo-France.

Les joueurs ayant expérimenté le jeu ont également suggéré qu'il soit mis à disposition sur la plateforme en ligne d'ANYWHERE et dans des formats permettant aux utilisateurs potentiels en dehors du projet de l'utiliser sans l'intervention des concepteurs initiaux. Dans ce but, nous avons publié un article scientifique décrivant en détail

les étapes méthodologiques nécessaires à la conception et à la mise en œuvre des scénarios d'inondation et d'orages-vents violents [Terti *et al.* 2019b]. Ce document a d'ores et déjà permis à d'autres chercheurs de mettre en œuvre une version adaptée du jeu afin de tester l'influence des informations issues des médias sociaux sur la prise de décision en situation de crise [Weyrich *et al.* 2020].

4.4 Synthèse et perspectives

Modélisations prédictives

Les deux modèles présentés ont l'avantage de prendre en compte les concomitances dangereuses entre les dynamiques sociales (mobilités quotidiennes, vulnérabilités spécifiques) et les dynamiques hydro-météorologiques (pluie, ruissellement et montée des cours d'eau) sur de grands territoires (d'un département français à l'ensemble des états des Etats Unis) et à des résolutions spatiales et temporelles importantes (du mètre au comté américain et de la minute à l'heure).

Le Modèle MobRISK établit un indice de risque basé sur la probabilité de passage d'automobilistes, en route pour leurs activités quotidiennes, sur des tronçons routiers au moment de l'inondation de ceux-ci. Les fortes résolutions temporelle et spatiale du modèle permettent d'explorer l'impact des crues soudaines sur les mobilités quotidiennes et les comportements d'adaptation individuels déclenchés en réaction à la perception du danger. Cet outil de simulation permet ainsi d'identifier les actifs, qu'ils soient cadres, professions intermédiaires, techniciens ou ouvriers, d'âge moyen et plutôt de genre masculin comme les catégories socio-démographiques les plus exposées.

Une des difficultés principales de l'usage de ce genre de modélisation C++ est liée à la nécessité d'avoir le support d'un ingénieur développeur, le modèle étant trop complexe pour un non expert. Le modèle MobRISK présente l'avantage d'être efficace en temps de calcul, de prendre en compte un grand nombre d'agents (100 000 et plus) donc potentiellement un territoire étendu ou densément peuplé. L'inconvénient de son utilisation est lié à l'importance de la phase de pré-traitement des données et le haut niveau d'expertise informatique nécessaire pour modifier le code C++ qui modélise toute la dynamique spatiale et temporelle. Comparé aux capacités d'interactions interpersonnelles entre agents que permet un modèle multi-agents, MobRISK représente une version simplifiée des interactions entre agents. Il ne tient pas compte de l'influence

cognitive que les agents peuvent exercer les uns sur les autres au moment de prendre leur décision. Ainsi les agents localisés au même endroit au même moment ne sont pas “conscients” de la présence d’autres agents et agissent selon leur propre perception de l’environnement et évaluation du danger.

Le choix d’un modèle à événements discrets vient de notre focalisation sur le risque routier et sur l’identification des intersections routes-rivières comme zones de danger où se rencontrent l’aléa hydrologique et l’enjeu humain. Ainsi tout notre raisonnement et nos calculs sont basés sur l’hypothèse que le principal danger est lié à l’usage de la voiture lorsque les routes sont inondées en des points bien précis. Le risque humain associé aux déplacements pédestres ou à l’inondation de bâtiments n’est pas pris en compte et demanderait d’intégrer des données représentant l’évolution temporelle de l’extension des crues et des hauteurs d’eau associées ainsi que de hauteur des bâtiments. Ces données hydrologiques sont pour l’instant difficiles à obtenir d’autant plus en contextes urbain et péri-urbain qui nécessitent une modélisation à forte résolution spatiale tenant compte des aménagements susceptibles de canaliser le ruissellement. Néanmoins la prise en compte des emplois du temps individuels quotidiens comme nous l’avons fait dans MobRISK permet de localiser, plus ou moins précisément selon les activités, les personnes à tout moment de la journée ou de la nuit et donc d’évaluer l’exposition des populations en tenant compte de leurs trajectoires de mobilités et du temps de séjour dans des bâtiments plus ou moins exposés.

Le choix d’un type de modèle par rapport à un autre est non seulement fonction du type de données disponibles mais également de la zone d’étude envisagée et de l’objectif visé. Ainsi dans le but de répondre à des besoins plus opérationnels, un autre type de modélisation, mis en oeuvre aux USA afin de prévoir à l’échelle du comté et sur l’ensemble du territoire des Etats Unis le risque de périr sur la route lors de crues rapides, a été développé en se basant sur une base de données assez exhaustive recensant les décès par crues rapides depuis près de 20 ans.

Dans cette seconde approche de modélisation, l’incertitude dans la quantification du risque humain lié aux véhicules est prise en compte en traitant de manière probabiliste l’occurrence des décès dus aux crues soudaines. Par rapport aux études précédentes, le risque humain est défini comme une probabilité évolutive d’incidents liés aux véhicules mais à des résolutions spatiales et temporelles moindre que le modèle MobRISK et sur l’ensemble du territoire des Etats Unis. Les résultats du modèle de *machine-learning* appliqué au cas des crues de mai 2015 au Texas et en Oklahoma sont encourageants pour identifier l’évolution spatio-temporelle du risque qui pèse sur les

déplacements quotidiens en période de crues rapides. Ainsi, le modèle prédit assez bien les probabilités élevées dans le cas d'événements de plus grande ampleur s'étendant à l'ensemble du comté. Par contre, le risque lié aux véhicules a tendance à être surestimé lors d'événements très localisés qui peuvent dépendre en grande partie de sensibilités locales difficiles à saisir avec les limites de résolution spatiale actuelle du modèle. L'évaluation interne de performance prédictive du modèle s'avère modérée ($0,5 < AUC=0,7 < 1,0$), mais ce résultat n'est pas surprenant étant donné la résolution grossière des prédicteurs utilisés.

En analysant l'importance des variables dans le modèle, il a été démontré que le débit de pointe joue le rôle le plus important dans la répartition des événements de crues soudaines (avec ou sans décès) lié à un véhicule. De nature dynamique, cette variable et la précipitation maximale décrivent toutes deux l'ampleur de l'aléa naturel. C'est surtout parce que ces variables dynamiques ont été déterminées avec des résolutions spatiales et temporelles beaucoup plus élevées que les données démographiques qu'elles arrivent à mieux saisir certaines conditions locales cruciales pour la survenue de circonstances dangereuses. Les variables qui décrivent les aspects sociaux (par exemple, l'âge médian, la taille du ménage) sont considérées comme des prédicteurs plus faibles dans le modèle. Toutefois, lorsque ces variables sont exclues de l'ensemble des prédicteurs, la capacité du modèle à prédire la probabilité d'accident automobile lors d'inondations soudaines est réduite. Ainsi des investigations plus poussées seraient nécessaires pour faire progresser la représentation de la dynamique de vulnérabilité humaine dans la méthodologie de prédiction.

La validation des modèles développés n'est pas un exercice simple. Des événements rares tels que des crues soudaines avec des victimes sont difficiles à prévoir. La même conjonction de conditions socio-hydrologiques identifiées comme mortelles lors d'inondations éclairées passées peut ne pas entraîner de décès lors d'un événement futur en raison de circonstances très locales qui ne peuvent pas être prise en compte sur la base des données disponibles actuellement. Pour évaluer plus en détail la performance de ces modèles, il faudrait disposer d'une grande quantité de données d'impacts précisément géolocalisées et horodatées. La généralisation de la collecte de telles données tirées d'appels aux services de secours [Papagiannaki *et al.* 2017], d'enquêtes post-événements telles que les données SHAVE [Calianno *et al.* 2013] et d'information extraites des médias sociaux [Morss *et al.* 2017, Cavalière 2019] semble une piste intéressante à creuser pour l'évaluation de tels modèles.

Jeu sérieux

Au delà de la validation des résultats de ces modèles se pose la question de leur utilité en matière de prise de décision de protection en situation d'urgence. Est-ce qu'une information sur le risque encouru est plus utile qu'une information sur l'aléa pour prioriser des opérations concrètes de sécurisation sur le terrain ? Comment développer des modèles de prévision des impacts répondant aux besoins des acteurs de terrain ? Sur la base des premiers tests exploratoires réalisés avec le jeu sérieux ANYCaRE, il semble que des modèles de prévision d'impacts socio-économiques aident la prise de décision. La localisation et l'estimation des impacts potentiels permettent de mieux cibler la réponse et surtout d'augmenter la confiance dans la décision prise.

Néanmoins la mise à disposition d'information sur les impacts observés en temps réels, communiqués via les réseaux sociaux peuvent également jouer ce rôle en faisant l'économie d'un investissement dans le développement de modèles complexes de prévision des impacts socio-économiques. En effet, pendant les crises, les médias sociaux regorgent d'informations parfois illustrées de photos ou vidéos produites de manière naturelle et spontanée par n'importe quel citoyen connecté qui souhaite partager ses observations ou communiquer avec son réseau sur la situation. La difficulté réside dans le foisonnement, la qualité/fiabilité et l'intérêt variables des informations qui circulent en temps de crise [Cavalière 2019]. De cette constatation est née en 2014 l'association VISOV (Volontaires Internationaux en Soutien Opérationnel Virtuel). Son objectif est de rassembler une communauté virtuelle francophone de volontaires numériques en gestion de crise (sécurité civile) pour promouvoir l'utilisation des Médias Sociaux en Gestion d'Urgence (MSGU).

L'intérêt d'une telle démarche est de permettre un tri, une organisation et une présentation de l'information pertinente et (géo)localisées pour sa mise à disposition des services de gestion de crise. Si la proportion de bénévoles de l'association également engagés dans la gestion de crise opérationnelle semble montrer l'intérêt de ce service pour la gestion de l'urgence, la question du rôle que pèse cette information temps réel par rapport aux sorties de modèles prédictifs en matière d'aléa ou d'impact reste entière. Le jeu sérieux ANYCaRE a ainsi pu servir de base au développement d'une adaptation méthodologique permettant d'envisager l'évaluation de l'impact d'informations de sources plus ou moins officielles et crédibles diffusées via les médias sociaux [Weyrich *et al.* 2020]. Le choix d'ANYCaRE pour le test d'hypothèses en matière de communication du risque ouvre de nouvelles perspectives pour la recherche dans ce

domaine, perspectives qui font l'objet de la section suivante concluant ce mémoire.

Conclusion et perspectives de recherche

Mes recherches passées se sont presque exclusivement focalisées sur la collecte de données comportementales, la compréhension et la modélisation/prédiction des réponses humaines à des événements hydro-météorologiques isolés provoquant des crises de courte durée et d'extension spatiale limitée. Forte de cette expérience, mes recherches actuelles poursuivent cet effort d'intégration des dynamiques de vulnérabilités sociales dans la prévision des impacts associés aux aléas hydro-météorologiques, notamment dans le cadre de ma participation au projet ANR Prévision immédiate intégrée des Impacts des Crues Soudaines (PICS) et du co-encadrement avec Véronique Ducrocq (Météo-France, CNRM) d'une thèse Météo-France visant la prise en compte de la vulnérabilité territoriale dans la vigilance Pluie-inondation.

D'autres recherches initiées récemment opèrent néanmoins une lente transition vers des échelles plus grandes, notamment celles associées au changement climatique et à toutes les problématiques comportementales et sociétales qui constituent à la fois la source du problème et sa solution. Mon intérêt premier reste centré autour de la compréhension des modes d'adaptation des pratiques individuelles face aux perturbations environnementales avec l'idée de ne plus uniquement regarder les réponses à l'échelle de crises courtes mais d'étendre la focale pour observer l'évolution des représentations et des pratiques sur le temps plus long (historique, inter-événementiel). Au contraire des processus météorologiques, le climat est un processus de grande échelle visible sur des dizaines d'années sur des régions du globe qui s'étendent au delà des instances de gouvernance locales ou même nationales.

Notre expérience sensible en tant qu'humains se limite bien souvent à notre appré-

hension quotidienne du temps qu'il fait et aux éventuelles anomalies saisonnières qui perturbent la réalisation de nos activités favorites, comme le manque de neige en hiver ou au contraire son excès dans des régions qui n'y sont pas habituées. Comme mes recherches précédentes l'ont montré, même lorsque le danger météorologique est annoncé pour les heures à venir, ou que l'inondation est à deux pas de nous, nous avons du mal à changer nos habitudes, à adapter nos activités pour intégrer ces contraintes momentanées à nos emplois du temps peu flexibles. La perception sensorielle de l'imminence du danger et son ressenti corporel apparaissent bien souvent comme les meilleurs moteurs des actions de protection dans ces circonstances extrêmes. Ces observations réalisées à l'échelle de crises courtes et brutales comme les crues rapides sont-elles généralisables sur des crises longues faites d'alternances entre situations de danger imminent provoquées par des aléas météorologiques et phases d'inter-crisis dont l'évolution des paramètres environnementaux est à peine perceptible pour qui n'y prend garde ?

L'observation d'un changement climatique fait appel aux statistiques et à la détection d'une tendance significative sur le temps long, tendance qui n'est d'ailleurs pas uniforme à l'échelle des différentes régions du globe. Ainsi si les discours des experts scientifiques du GIEC ont mis plusieurs dizaines d'années à faire évoluer les représentations en faveur d'une acceptation sociale de l'idée de réchauffement climatique d'origine anthropique et de ses conséquences désastreuses, la solution au problème n'est malheureusement pas concomitante de sa réalisation. La solution se trouve dans l'effort conjoint de chacun d'entre nous et passe par un changement fondamental des normes et valeurs sociales en faveur de modes d'habiter la terre plus sobres. Ainsi toutes les échelles sociales et institutionnelles doivent être mobilisées en ce sens de manière simultanée à l'échelle planétaire. L'exemple récent de la crise liée à la COVID-19 nous montre qu'une action immédiate et quasi-simultanée de la plupart des Etats du globe est possible même si elle est douloureuse socialement et économiquement. Elle a un effet majeur et rapide sur les comportements individuels, sur le fonctionnement de nos économies consommatrices de ressources naturelles et par conséquent sur nos émissions de gaz à effet de serre, de polluants et sur la santé des socio-écosystèmes.

Ces observations optimistes nous prouvent que la situation n'est pas inéluctable, que nous avons encore le pouvoir d'agir, et que la nature peut-être résiliante si on diminue drastiquement le forçage anthropique. Néanmoins, cette crise, comme toutes les crises mais à une échelle bien supérieure, a mis sur le devant de la scène la vulnérabilité de nos sociétés modernes et les fortes inégalités sociales qu'elles engendrent.

La question de la mise en pratique de la participation citoyenne dans un objectif de mitigation des risques mais également de réponse à des questions de recherche scientifique est un challenge que tente de relever les sciences participatives. Le déploiement d'outils d'observation participative pour sensibiliser aux problématiques environnementales (perte de biodiversité, dégradation environnementale...) et comprendre les processus naturels et anthropiques en jeux s'est largement développé ces dernières années [Becu 2020]. Néanmoins, quand il s'agit de s'intéresser à l'effet de ces outils sur les comportements des participants à court et moyen termes, et plus largement sur la culture du risque, les méthodes d'évaluation scientifique du processus restent balbutiante. Ainsi, dans le cadre de mes recherches à venir je m'interroge sur les outils et méthodes permettant de faire évoluer la culture du risque et les pratiques en matière d'adaptation et de mitigation face à la récurrence, voir à l'augmentation de la fréquence ou de la sévérité des risques météorologiques liés aux changements climatiques et anthropiques.

Face à ces évolutions climatiques et anthropiques, l'Etat promeut la résilience comme nouveau fondement de la culture du risque pour "faire avec" l'occurrence d'événements complexes aux effets dominos souvent qualifiés d'imprévisibles. Même si cette injonction à plus de résilience relève, dans les faits, d'une forme d'instrumentalisation, elle paraît une piste intéressante à creuser pour permettre une appropriation locale des risques et la diminution des vulnérabilités par le biais d'actions de participation citoyenne [Quenault 2015].

Ainsi pour terminer ce mémoire, ce chapitre brosse le tableau de ces travaux récents qui initient l'ouverture des thématiques de recherche et des projets que je souhaite pousser dans les années à venir. Ainsi, je commencerai par évoquer la poursuite des projets de modélisation des impacts des crues rapides, d'intégration de la vulnérabilité sociale dans la vigilance pluie-inondation de Météo-France et mon implication récente dans l'appréhension géo-historique des événements de crues à forts impacts dans les Alpes. Sur une thématique proche, je détaillerai mon nouvel investissement dans le domaine des jeux sérieux par le développement d'ANYCaRE, un jeu de rôles pour favoriser la compréhension et la coopération entre scientifiques et acteurs opérationnels de l'alerte et la gestion de crise et les pistes de recherches associées. Enfin, je terminerai par une exploration rapide des pistes de recherche liés à des projets moins avancés ouvrant mon horizon à de nouveaux terrains et contextes socio-culturels et à la notion de service climatique.

5.1 Trajectoires de vulnérabilité aux risques hydro-climatiques : exploration des interactions d'échelles

ENCADREMENTS : Thèse de Jean-Loup Gayrard (2019-22), thèse d'Eva Boisson (2019-22), Thèse de Javed Ali (2018-19 arrêtée au bout d'1 an), post-doctorat de Galateia Terzi (2020-2021).

COLLABORATEURS : S. Anquetin et B. Wilhelm (IGE), V. Ducrocq (CNRM, Météo France), J. Dugdale et C. Adam (Laboratoire d'Informatique de Grenoble-LIG), E. Garnier (UMR 6249 Chrono-Environnement).

PROGRAMMES DE RECHERCHE : Bourse de thèse Météo-France (J.-L. Gayrard), Bourse de thèse CNRS transverse INSU-InSHS (E. Boisson), 1/2 bourse de thèse Make our Planet Great Again (J. Ali), ANR PICS (2018-22).

PUBLICATIONS : Boisson *et al.* [2020].

Je propose d'aborder l'étude des interactions d'échelles en matière de vulnérabilités sous deux angles d'attaque. Le premier en essayant d'évaluer l'impact de différentes façons de communiquer la vigilance météorologique et le risque associé sur les représentations individuelles et la prise de décision en situation d'incertitude et l'effet que cela peut induire à l'échelle collective en matière de vulnérabilité territoriale. Le second angle d'attaque s'intéresse aux trajectoires de vulnérabilité territoriale et aux représentations du risque des acteurs via le prisme des écrits historiques relatant les événements hydrologiques marquants des 150 dernières années dans la vallée de l'Arve en Haute-Savoie.

5.1.1 Des comportements individuels aux vulnérabilités territoriales : quels indicateurs pour raffiner la vigilance Pluie-Inondation ?

Contexte

Du point de vue de la gestion collective des crises, de nombreux acteurs sont impliqués aux différentes échelles administratives du maillage territorial français. Les services de prévision météorologique et hydrologique en charge d'établir les bulletins et cartes de vigilance constituent le premier maillon de la chaîne d'alerte à la population. Initiée il y a près de 20 ans et dédiée à la fois au grand public et aux gestionnaires de crise, la vi-

gilance météorologique est en passe de subir de profonds changements pour s'adapter aux contextes normatifs national et européen et répondre aux objectifs de responsabilisation des citoyens face aux risques.

A l'horizon 2022, le dispositif d'avertissement météorologique s'enrichira notamment, dans certaines situations météo prévisibles avec une confiance suffisante, et pour certains paramètres uniquement, d'informations complémentaires à l'échelle infra-départementale. Cette précision géographique améliorée de la vigilance permettra à terme de s'affranchir des limites territoriales administratives pour se rapprocher de l'emprise physique réelle du phénomène (sans toutefois descendre pour autant à l'échelle de la commune, ce que ne permet pas l'état de l'art actuel). La future vigilance infra-départementale couvrira l'ensemble de la journée J+1 et donc ira au-delà des 24h d'échéance (en vigueur depuis son lancement en octobre 2001). L'information sera également séparée en 2 cartes de synthèse distinctes, une pour la journée J en cours et une autre pour le lendemain J+1. La prise de décision de mise en vigilance tiendra compte également d'éléments sur les principales vulnérabilités territoriales (via une collaboration étroite entre Météo-France et la Sécurité Civile).

Par ailleurs, la communication des vigilances via le site internet de Météo-France et autres médias modernes de type réseaux sociaux a déjà récemment évolué en juin 2020 pour :

- Intégrer des informations probabilistes concernant les risques de phénomènes dangereux entre J+2 et J+7 au-delà de la période de validité de la carte de vigilance.
- Supprimer sur la carte de synthèse nationale les pictogrammes jusqu'ici utilisés pour les niveaux orange ou rouge (pour des raisons de lisibilité). Un deuxième niveau d'information (nécessitant un clic de l'utilisateur) permet désormais de visualiser les niveaux de vigilance (vert à rouge) pour chacun des 9 types d'aléa pris individuellement.
- Mettre à disposition les animations heure par heure de ces risques mono-paramètres.

Selon une étude du CREDOC (Centre de Recherche pour l'Étude et l'Observation des Conditions de Vie), 90% des français connaissent la vigilance météorologique actuelle. Le code couleur est bien compris mais seuls 10% des français vont au-delà du pictogramme pour s'intéresser au bulletin de suivi régional pour lequel un clic de

l'usager est nécessaire (alors que le bulletin national est accessible directement sous la carte). Malgré cela de nombreux accidents fatals lors de ces épisodes restent dûs à des comportements inappropriés [Becker *et al.* 2015]. Par exemple, le niveau de vigilance orange associé aux épisodes de pluie-inondation, déclenché plus fréquemment que la vigilance rouge, apparaît aux yeux du grand public comme un signal de danger incertain et peu fiable. Celui-ci ne suffit pas forcément à l'initiation de comportements de protection bien que beaucoup d'accidents fatals surviennent pendant la vigilance orange [Ruin 2007b, Ruin *et al.* 2009, Durand et Ruin 2018]. Les évolutions sur le contenu et la forme des informations de vigilance sont susceptibles de faire évoluer les représentations actuelles. Si l'objectif du nouveau format de la vigilance est de rendre le citoyen acteur de sa propre décision et plus apte à adopter des comportements éclairés face au danger, nous n'avons pour l'instant aucune idée de l'impact réel qu'auront ces évolutions sur les pratiques individuelles et collectives qui peuvent être source de vulnérabilité humaine lors d'épisodes de pluie-inondation.

Objectifs et problématique

Dans le cadre de ces évolutions en cours de la vigilance et de la collaboration avec Météo-France, deux objectifs principaux motivent l'orientation de la thèse interdisciplinaire sur la vigilance que je co-encadre avec Véronique Ducrocq. Le premier objectif s'intéresse à la question de l'intégration d'indicateurs de vulnérabilité territoriale pertinents pour la mise en vigilance et la gestion de crise à l'échelle infra-départementale. Le second se focalise plus spécifiquement sur les effets de ce changement de format de la vigilance Pluie-Inondation sur les représentations et l'adaptation des comportements face au risque annoncé. En parallèle de ce travail, mon implication dans le cadre du projet PICS visant le développement d'une chaîne de prévision intégrée des impacts des crues soudaines, porte plus spécifiquement sur le volet de la prévision des impacts humains dans la droite ligne des modélisations présentées au chapitre précédent. Ces deux lignes de recherche présentent des complémentarités évidentes.

L'intégration dans la vigilance d'indicateurs de vulnérabilité territoriale à l'échelle infra-départementale demande, de par sa visée opérationnelle pour la sécurité civile, de prendre en compte les dynamiques journalières à infra-journalières d'exposition de la population à l'origine d'une grande partie des opérations de secours lors des épisodes de pluie-inondation. La majeure partie des dynamiques d'exposition est liée aux rythmes des mobilités quotidiennes relativement prévisibles sur la base des caracté-

ristiques socio-démographiques des populations résidentes. C'est sur cette base que nous avons déjà construits les modèles MobRISK ou le modèle probabiliste utilisé aux Etats Unis qui a d'ailleurs montré l'intérêt de la variable "naveteur" pour la prévision des impacts humains. D'autres dynamiques plus ponctuelles ou saisonnières, comme les flux liés aux activités touristiques ou festivières drainant un surplus de population de manière diffuse ou localisée sont plus difficiles à appréhender au pas de temps journalier.

L'objectif d'opérationnalité du modèle pour un usage prévisionnel est un challenge. Ainsi, il est inenvisageable d'utiliser dans la chaîne d'alerte un modèle aussi complexe et détaillé que celui de MobRISK ou qu'un modèle à base agent du fait du temps de calcul, des limites en terme d'extension spatiale/quantité d'agents ou de leurs capacités prédictives difficiles à évaluer. Le modèle de prévision développé aux USA répond mieux aux objectifs qui sont ici les nôtres, néanmoins nous ne disposons pas des mêmes données d'impacts humains pour utiliser un modèle par apprentissage. Il faut donc trouver une alternative simple à mettre en oeuvre mais capable de faire la synthèse des principaux paramètres de la vulnérabilité "statique" (qui évolue de manière annuelle ou pluriannuelle) et de la vulnérabilité dynamique (évolution infra-journalière à mensuelle). Un modèle spatialisé du type du Social Vulnerability Index (SoVI) développé par Cutter [2003] semble plus approprié. Néanmoins le SoVI n'est pas directement applicable à notre cas car celui-ci a un objectif trop générique. Il n'est pas spécifique à un type d'aléa naturel, notamment ceux à dynamique rapide, et couvre toutes les phases du cycle du risque et non uniquement la phase d'urgence associée à la mise en sécurité des populations qui nous intéresse spécifiquement.

Sur la base de ces réflexions le travail de thèse menée avec Météo-France tâchera de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les facteurs explicatifs de la vulnérabilité territoriale au risque de crue soudaine spatialisables sur la base de données standardisées collectées nationalement ?
- Comment élaborer des indicateurs simples rendant compte des variations temporelles et spatiales de l'exposition des populations ?
- Comment valider ces indicateurs et leurs modalités de pondération en intégrant des données issues de retours d'expérience et la connaissance experte des acteurs de terrain ?

-
- Comment intégrer des indicateurs infra-départementaux de vulnérabilité au sein du dispositif de vigilance compte-tenu i) des contraintes de résolution spatiale et temporelle des modèles d'aléa et ii) des enjeux communicationnels en matière de protection des populations exposées ?

Les enjeux communicationnels mentionnés dans la dernière question font écho au deuxième objectif de cet axe de recherche. En effet, si la nature de l'information de vigilance distribuée évolue pour intégrer des indicateurs de vulnérabilité territoriale et une résolution infra-départementale, se pose la question des nouvelles représentations et comportements que cela va engendrer aussi bien pour les gestionnaires de crise que pour le grand public. Ce second axe de recherche vise à répondre aux questions suivantes :

- Comment anticiper les éventuels effets positifs ou négatifs du nouveau dispositif avant que celui-ci ne soit mis en place ?
- Ces évolutions permettant de mieux anticiper la localisation et la temporalité des circonstances dangereuses auront-elles un impact sur le niveau de confiance dans les vigilances et donc sur la temporalité et/ou la nature des décisions prises en matière de protection des biens et des personnes ?
- Quels types de contenu et format des messages de vigilance et d'alerte au public sont-ils les plus à même de susciter des comportements prudents de la part des personnes exposées ?

Méthodes

Afin de répondre à ces questions deux types de méthodologie combinant les approches quantitatives de modélisation et qualitatives par le recours aux entretiens et à l'usage du jeu sérieux seront mises en oeuvre.

Sur le plan de la modélisation, deux approches sont développées en parallèle. Dans le cadre de la thèse co-encadrée avec Météo-France, un modèle spatialisé du type du SoVI de Cutter [2003] sera créé sous système d'information géographique . L'objectif est de produire des cartes de vigilance pluie-inondation infra-départementales intégrant à la fois la probabilité et la gravité potentielle des impacts sociaux de ces événements pluvieux intenses, en identifiant la combinaison d'indicateurs hydro-météorologiques

et socio-spatiaux pertinents et les seuils critiques concourant à l'occurrence d'événements à forts impacts. Il s'agira de prendre en compte à la fois les variables à évolution lente qui pré-conditionnent les situations à risque (état hydrique des sols, périodes de retour des intensités de pluies, caractéristiques des bassins versants, occupation des sols, types d'urbanisation, démographie, mesures de gestion du risque, historique des catastrophes...) et les variables à évolution rapide (distribution spatio-temporelle et intensités des pluies, mobilité de la population, pratiques de gestion de crise, nature et qualité de l'information et la communication de crise, circonstances aggravantes...) conditionnant la concomitance de facteurs critiques pouvant émerger lors de l'événement. Plusieurs étapes seront nécessaires à sa réalisation, il s'agira de :

- choisir la résolution spatiale et temporelle des données sociales la plus pertinente à mettre en regard des données d'aléa issus des modèles de prévisions des phénomènes de pluie-inondation de Météo-France,
- identifier, sur la base des facteurs de vulnérabilité et de risque mis en avant par les travaux de **Terti [2017]** aux USA et du référentiel national de vulnérabilité aux inondations [MEDDE *et al.* 2016], les variables spatialisées issues de bases de données standardisées (e.g. données INSEE, IGN, DGFIP¹, DGPR²...) utilisables comme variables proxy représentatives des dynamiques du risque associé aux crues soudaines,
- produire des indicateurs normalisés (pourcentages, densités, incidences...),
- réduire le nombre de variables sur la base de tests statistiques de colinéarité par l'analyse en composante principale,
- tester différentes méthodes d'agrégation et de pondération des indicateurs hydro-météorologiques et socio-spatiaux sélectionnés sur la base i) de l'élucation d'experts des services opérationnels en charge de la vigilance et de la gestion du risque ; ii) du rejeu de certains événements catastrophiques passés ayant fait l'objet de retours d'expérience et représentant la diversité des combinaisons de facteurs possibles. Les cas d'étude utilisés seront sélectionnés parmi ceux identifiés dans le cadre du projet PICS,
- les performances du modèle seront finalement évaluées par comparaison avec l'ancien système de vigilance sur la base du calcul de scores (taux de réussite, fausse alarme, faux-positifs, ratés) pour des cas d'études passés différents de ceux utilisés pour le développement du modèle.

¹Direction Générale des Finances Publiques

²Direction Générale de la Prévention des Risques

En complément dans le cadre du projet PICS, nous aurons recours à un autre type de modèle, un modèle multi-agents développé via la plateforme GAMA. L'objectif est ici de tester des hypothèses quand aux effets des nouveaux formats de vigilance et consignes de protection sur l'adaptation des pratiques quotidiennes, la mise en protection et la probabilité d'occurrence de situations à enjeux humains. Le simulateur De-BRIEFF³ proposé a vocation à intégrer les connaissances expertes acquises depuis le début de mes recherches sur l'adaptation des comportements individuels en situation de crues rapides [Ruin 2007b, Ruin *et al.* 2014, 2017, Durand et Ruin 2018, Terti *et al.* 2015, 2017]* afin d'envisager l'émergence de situations dangereuses sur la base de l'interaction des agents (individus) entre eux et avec leur environnement en évolution rapide (Figure 5.1).

Développé en interaction avec le groupe utilisateurs du projet PICS, rassemblant différents acteurs de terrain de la gestion de crise, il a pour objectif principal de tester des hypothèses et répondre aux questions en lien avec les enjeux communicationnels détaillés précédemment. A terme, moyennant une adaptation de son interface, une simplification et l'ajout d'éléments ludiques de *gamification* il pourra être utilisé comme jeu sérieux pour la formation ou l'entraînement à la gestion de crise ou à la prise de décision en situation d'urgence (cf. projet Expériences immersives et résilience comportementale détaillé ci-après).

Si ces deux modèles tentent d'envisager les liens entre actions individuelles et vulnérabilité territoriale à l'échelle de l'événement, le projet suivant opère un changement d'échelle pour envisager les trajectoires de vulnérabilité et de risque sur une longue période de temps comprenant une alternance d'événements de crues dommageables et de périodes sans événements notables.

5.1.2 150 années d'histoire de crues dommageables : quelles trajectoires de vulnérabilité dans les Alpes du Nord ?

Contexte

L'objectif principal de cet axe de recherche est d'appréhender la notion de risque et d'événements hydro-climatiques à forts impacts sociaux par une approche croisée des

³Decisions and Behavioral Responses for Impact Estimation in Flash Floods

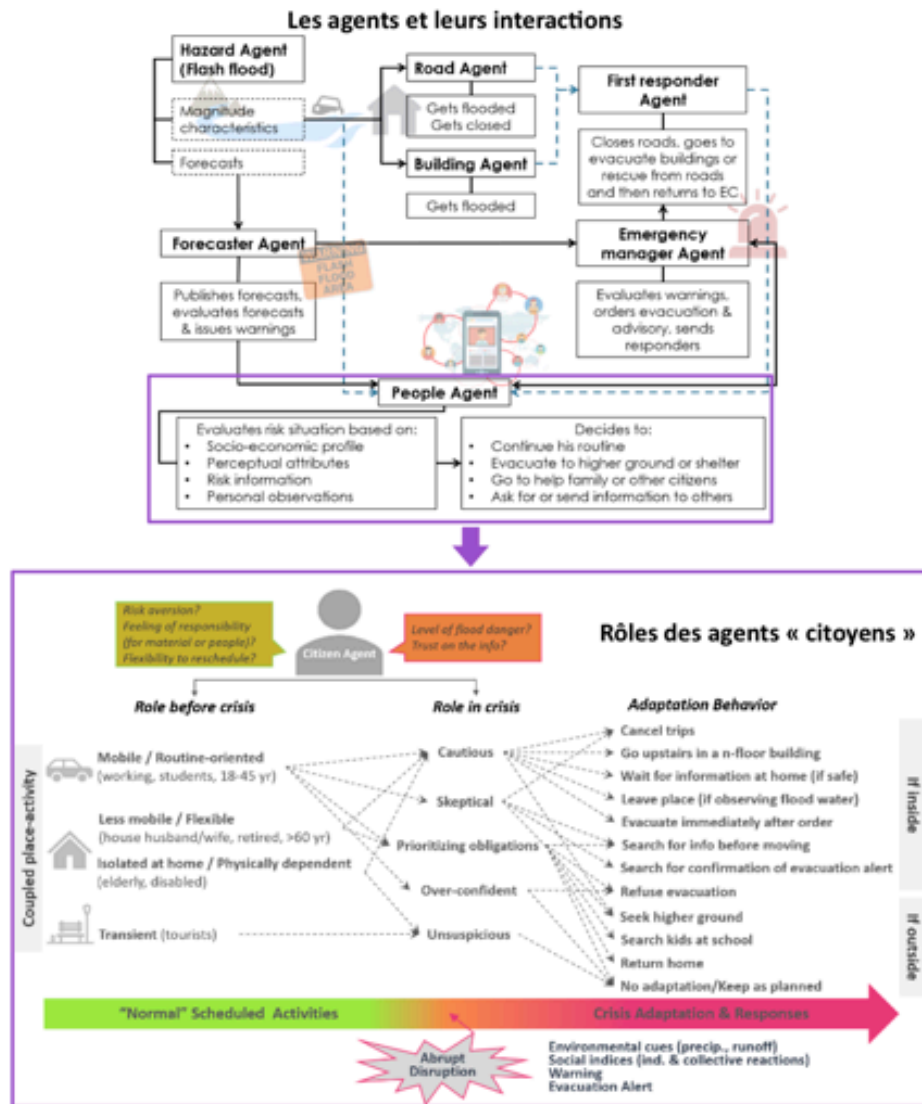


FIGURE 5.1 — Spécifications du simulateur multi-agent DeBRIEFF. Formalisation des relations entre agents et des rôles attribués aux agents “citoyens”. Source : [Terti 2020]

dynamiques naturelles (aléa hydrologique) et sociales (exposition, vulnérabilités et perception des impacts socio-économiques) sur le temps long (150 ans).

La difficulté pour appréhender les risques hydrologiques et leurs évolutions provient essentiellement de la courte durée des séries d’observations. Pour pallier cette limite, des informations historiques et médiatiques documentant de nombreux événements dans les Alpes du Nord (crues de l’Arve et ses affluents) ont été collectées sur la période 1850 - 2015 [Mélo *et al.* 2015].

L’intérêt mais aussi la complexité de ce type de matériaux est qu’il aborde le risque par l’expression des impacts perçus par les sociétés. Ainsi les écrits historiques ou/et

médiatiques peuvent permettre de retracer la récurrence d'un phénomène naturel selon sa sévérité physique et d'après les dommages, perturbations ou adaptations que celui-ci a engendré. Néanmoins ils sont également le reflet de la manière dont les sociétés perçoivent et acceptent le risque à travers les différentes époques, et de l'évolution de ce qui est valorisé et donc considéré comme 'enjeux importants' par ces sociétés [Garnier 2019]. Ainsi les archives historiques relatant les événements dommageables passés font la synthèse de trois types de dynamiques, celle liée à la variabilité du phénomène (qu'elle soit naturelle ou liée à l'évolution climatique anthropique), celle reflétant les rythmes d'exposition et de vulnérabilité des sociétés locales ainsi qu'une composante plus subjective qui agit comme un filtre déterminant la portée symbolique d'un événement plutôt qu'un autre. Démêler l'influence de ces trois dynamiques pour identifier les combinaisons de facteurs et les seuils critiques qui, aux différentes époques, ont conduit les sociétés à considérer des événements de crues dommageables comme des événements particulièrement remarquables, que nous désignons ici comme événements à forts impacts, nous paraît nécessaire pour envisager leur prédictabilité dans une perspective de changement global.

Problématique et questions de recherche

L'objectif de démêler les différents facteurs d'influence physique et sociale à l'origine des événements à forts impacts répertoriés pendant les 150 dernières années sur le bassin de l'Arve (Haute-Savoie) m'a conduit une fois de plus à adopter une approche interdisciplinaire. C'est ainsi qu'avec Bruno Wilhelm, mon collègue paléo-hydrologue, nous avons eu la chance de pouvoir réunir nos disciplines avec celle de l'histoire dans le cadre d'un nouveau type de financement pour la réalisation de thèses transverses à plusieurs instituts du CNRS (dans notre cas l'INSU et l'InSHS). Sur la base de l'analyse et de la contextualisation historique des données d'impacts répertoriées dans le cadre de la base de données HIFAVa pour "*Historical Impacts of Floods in the Arve Valley*" et d'entretiens auprès d'acteurs de la gestion du risque à différents échelons territoriaux (e.g. gestionnaires de bassin, élus, etc), ce travail de thèse tâchera de répondre aux questions suivantes :

- Peut-on définir une échelle de sévérité des impacts perçus qui permettent de catégoriser et de comparer les événements dommageables de façon diachronique ?
- Sur quels critères est-il possible de caractériser et d'identifier les événements considérés à forts impacts selon les sociétés et les périodes de l'histoire ?

- Quelle combinaison de facteurs physiques et sociaux et/ou quels seuils critiques concourent à leur attribuer le statut d'événement à forts impacts selon les époques ?
- Dans quelle mesure peut-on envisager l'utilisation de cette échelle de gravité et des illustrations historico-médiatiques associées comme outils de communication et de prévention des risques sur le bassin de l'Arve.

Méthodes

Plusieurs étapes devraient permettre de répondre à ces questions. La première consistera à finaliser l'effort de dépouillement des archives historiques et de collecte d'informations médiatiques afin de constituer une base de données spatio-temporelle d'événements considérés comme extrêmes soit du point de vue des circonstances hydro-météorologiques, soit de celui des impacts sociaux enregistrés et revendiqués par les communautés concernées.

La version actuelle de la base de données HIFAVa initiée par les travaux d'un historien a depuis été complétée pour atteindre un peu plus de 900 enregistrements d'impacts différents sur les 106 communes localisées dans le bassin versant de l'Arve [Mélo *et al.* 2015, **Boisson *et al.* 2020***]. A partir d'une première classification des impacts sur la base de leur contenu textuel à l'aide du logiciel KH Coder [Higuchi 2016], il est alors possible de conduire une analyse diachronique des types et de la quantité d'impact au regard de celui du nombre d'événements⁴ ou de l'évolution du nombre de sources d'information. Il s'agira également d'étudier leur distribution spatio-temporelle à l'aune des caractéristiques hydro-morphologiques et climatiques des bassins versants, de l'évolution de l'occupation des sols, de la démographie mais aussi des trajectoires locales et nationales de gouvernance et de gestion du risque (Figure 5.2). L'un des verrous scientifiques majeur consiste ainsi à identifier des liens de causalité entre les différents types d'impacts et les composantes du risque (aléa, exposition et vulnérabilité) ainsi que les configurations les plus néfastes concourant à la survenue d'un événement considéré à fort impact par les sociétés à travers les âges.

En complément, l'appréhension de la notion d'événements à fort impact fera appel à l'usage d'entretiens semi-directifs avec des gestionnaires du risques à différentes échelles territoriales afin d'identifier les éléments qualitatifs et quantitatifs conduisant à l'identification d'événements fondateurs et marqueurs de la mémoire collective.

⁴un événement rassemblant tous les impacts observés à la même date

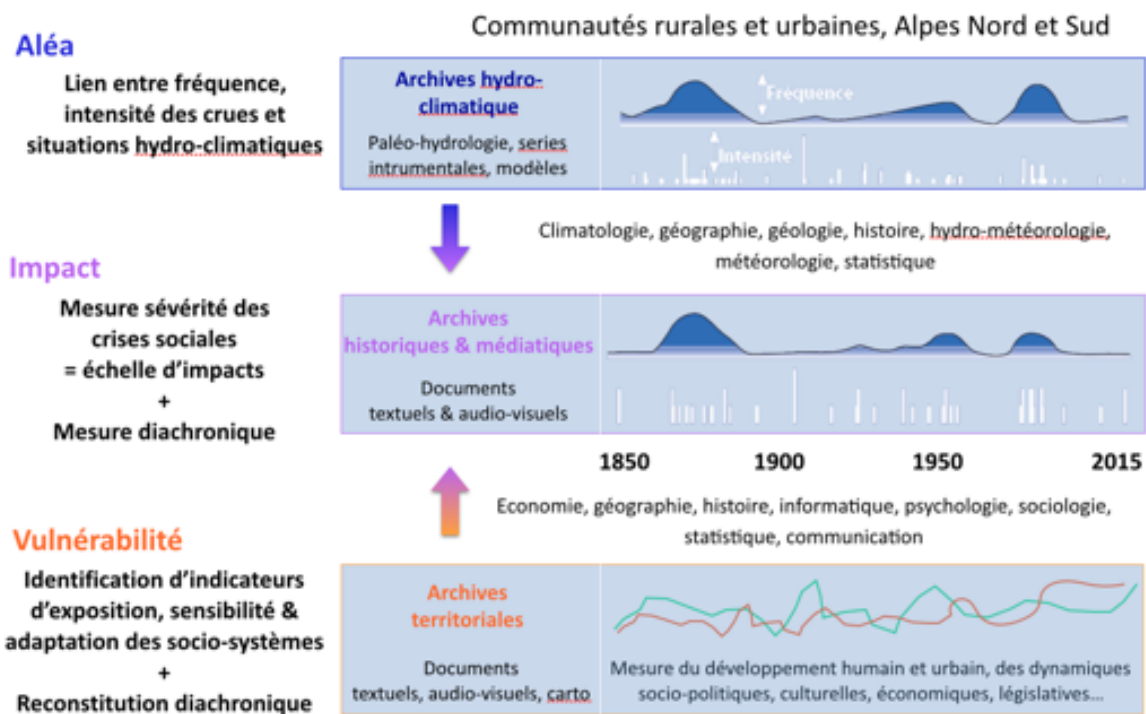


FIGURE 5.2 — Schéma de synthèse de l'approche conceptuelle adoptée pour identifier et caractériser les événements à forts impacts sur la vallée de l'Arve.

5.2 Le projet “Expériences immersives et résilience comportementale”

ENCADREMENTS : Thèse de Jean-Loup Gayrard (2019-22), post-doctorat de Galatea Terti (2020-2021).

COLLABORATEURS : S. Anquetin (IGE), V. Ducrocq (CNRM, Météo France), J. Dugdale et C. Adam (LIG), M. Mermillod et R. Palluel-Germain (Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition-LPNC), N. Bécu (UMR LIttoral, ENvironnement et Sociétés-LIENSs), A. Chalabaev (Laboratoire Sport et ENvironnement Social-SENS), C. Assié (Association Centre Permanent d'Initiatives pour l'Environnement-CPIE du Velay), H. Buccholz, Y. Beal, F. Maiaux, L. Druon (collectif d'artistes “1€ ne fait pas le Printemps”).

PROGRAMMES DE RECHERCHE : Bourse de thèse Météo-France (J.-L. Gayrard), demande de financement en cours à la Fondation MAIF.

Contexte

Comme j'ai pu le montrer dans mes recherches antérieures, les comportements considérés comme irrationnels, pouvant aboutir à des mises en danger inutiles, sont bien

souvent le fruit de décisions parfaitement rationnelles si on les examine du point de vue de la personne considérée. Ainsi, la plupart des témoignages des victimes de crues soudaines montrent [**Ruin et al. 2014, Durand et Ruin 2018**] :

- une difficulté à se représenter la violence et la rapidité du phénomène,
- une difficulté à faire sens des situations de crise sur la base d'informations météorologiques et hydrologiques imprécises (vigilance à l'échelle départementale et de grands bassins alors que les crues rapides sont souvent très localisées et concernent de petits ruisseaux à sec la plupart de l'année) et incertaines (notamment la vigilance orange),
- le rôle ambigu et limité de la mémoire des crues passées,
- l'emprise des contraintes quotidiennes et des charges mentales associées sur le niveau d'attention porté aux signaux d'alerte et sur les comportements de mise en protection.

Dans le contexte des événements de crues soudaines les émotions viscérales vécues au moment de la prise de décision sont souvent apparues comme un facteur clé de l'adaptation de la réponse comportementale à la dynamique rapide du phénomène [**Ruin et al. 2014, Durand et Ruin 2018**]. Ainsi, dans un contexte préventif, il paraît intéressant d'utiliser les émotions et le ressenti pour créer des expériences sensibles inédites qui pourront évoquer, dans les conditions de sécurité d'une situation fictive, les conditions de la prise de décision en situation d'incertitude et de danger imminent.

A cette fin de mise en situation imaginaire de prise de décision, le domaine de la simulation participative⁵ recouvrant les approches de *simulation and gaming*, de modélisation d'accompagnement et de jeux sérieux s'est fortement développé depuis une cinquantaine d'années. Ces outils, entre jeu et simulation, permettent aux utilisateurs de vivre une expérience impliquant un ressenti émotionnel suscité par une mise en situation fictive faisant écho à la subjectivité de chacun [Becu 2020]. Ces simulations engagent les utilisateurs dans une prise de décision (individuelle ou collective) qui influence le cours du scénario et permet d'apprendre, en toute sécurité, des conséquences des choix réalisés dans le cours du jeu [Lavoué 2012].

⁵Selon Becu [2020], la simulation participative est une simulation dont le déroulement est contrôlé par un groupe de personnes qui, en fonction d'un ensemble de règles, sont amenées à interagir librement pour répondre à différents objectifs.

Les formats d'outils et d'objectifs (formation, acquisition de compétences ou développement des capacités au sein d'un groupe...) liés à la simulation participative sont variés. On peut recenser un grand nombre de jeux informatisés dont la complexité dépend du public visé. Certains peuvent être joués en moins d'une heure par des étudiants, comme c'est le cas de *SPRITE* [Taillandier et Adam 2018] alors que d'autres comme *LittoSIM* [Amalric *et al.* 2017] prennent une demi-journée avec des experts de la gestion des inondations. D'autres formats, comme les jeux de plateau ou de cartes, ont l'avantage de pouvoir être joués partout, par les populations les plus vulnérables au changement climatique. Par exemple, *Weather or Not* est un jeu de cartes pour 25 à 50 joueurs avec un modérateur pour s'entraîner à la prise de décision face à des prévisions météo incertaines (probabilité d'inondation) en contexte de changement climatique. *Before the Storm* est un jeu de rôles coopératif pour faire discuter population et décideurs sur la gestion de désastres naturels. *Climate Message* propose à un groupe d'une dizaine de personnes d'explorer comment communiquer efficacement des prévisions météo. Dans *Seasonal Forecast Game* les joueurs (entre 10 et 20 joueurs) doivent aussi prendre des décisions sur la base de prévisions météorologiques incertaines et en observent ensuite les conséquences.

De nombreux travaux ont démontré l'intérêt des approches ludiques en matière d'apprentissage cognitif, d'action sur les émotions et les comportements, d'acquisition de « *soft et social skills* » et de compétences et savoir-faire techniques [Boyle *et al.* 2016, Hainey *et al.* 2016]. Le jeu de rôle ANYCaRE, précédemment décrit dans ce mémoire, a été développé pour sensibiliser et entraîner divers acteurs à la prise de décision collective face aux incertitudes et dilemmes émotionnels posés par des situations de crises météorologique et technologique [Terti *et al.* 2019b]. Si cet outil, déjà testé à de nombreuses reprises, a reçu un accueil très favorable des publics scolaires, étudiants, experts et décideurs, il reste perfectible notamment sur le plan ludique, vis-à-vis de sa modularité pour une meilleure transférabilité aux acteurs des territoires et de sa capacité à tester des hypothèses de recherche en lien avec les ressorts informationnels de la prise de décision en situation de crise [Weyrich *et al.* 2020].

Objectifs et problématique

Sur la base de ces avancées scientifiques et de l'expérience des partenaires du projet dans ces domaines, ce projet fait l'hypothèse que l'expérience sensible acquise par le biais d'une immersion dans une simulation participative ponctuelle, qu'elle soit indivi-

duelle (jeu sérieux en ligne) ou collective (jeu de rôles), ou d'une participation active à une création artistico-poétique, est à même de faire changer les représentations et comportements face aux risques. Sur la base de cette hypothèse principale, nous proposons de :

- Tester les effets à court et moyen termes de ces différents formats de participation sur les apprentissages et savoir-être,
- Nicher au cœur du développement de ces outils participatifs le test de variables visant à évaluer l'impact de différents contenus informationnels (information probabiliste versus déterministe, information incarnée induisant une tendance à l'action, comme par exemple l'évocation de la proximité spatiale et temporelle du danger) sur les représentations, les décisions en matière de mise en protection et le niveau de confiance dans la décision prise.

Le projet proposé se base sur une forte expertise scientifique et pratique dans les divers domaines concourant à la fois à la création d'outils artistico-ludiques, à leur mise en œuvre auprès de publics variés, et à la co-construction de questions de recherche et de protocoles expérimentaux interdisciplinaires permettant de bénéficier scientifiquement du déploiement simultané de tels outils sur les territoires partenaires. A notre connaissance, très peu d'expérimentations scientifiques impliquant une telle diversité d'acteurs scientifiques et opérationnels, mêlant les approches artistiques et de simulation participative, ont pour l'instant été développées dans le but d'accompagner et de tirer les leçons de l'évolution en cours d'un outil règlementaire et institutionnel tel que celui de la vigilance météorologique. Ce projet vise plusieurs objectifs :

- Permettre à différents types de publics (des scolaires au grand public, en passant par les décisionnaires en matière de risque et de gestion de crise : élus, prévisionnistes conseil) d'acquérir des connaissances et développer leur expérience sensible et savoir-être face aux crises hydro-climatiques,
- Renforcer les capacités de ces publics à anticiper face aux risques et à interpréter et personnaliser les informations de vigilance sur la base des évolutions en cours,
- Évaluer la production de comportement à risque et la tendance à l'action suite à la communication i) d'informations probabilistes (versus déterministes), ii) d'informations plus ciblées dans le temps et dans l'espace,

-
- Créer des opportunités d'actions collectives participatives associant population, élus et décisionnaires, experts et monde associatif pour la prévention des risques au travers de l'organisation d'ateliers réunissant des publics variés autour des outils développés,
 - Fournir des outils (jeu sérieux grand public, jeu de simulation participative à destination des décideurs, création scientifico-artistique) « clé en main » aux acteurs des territoires en charge de la gestion des risques et des crises.

Sur la base des dernières avancées scientifiques, nous proposons de nous inspirer d'un séjour collectif en immersion sur le terrain des crues cévenoles d'automne, de témoignages et des connaissances acquises par l'équipe par retours d'expérience depuis 2003, pour créer et tester différents outils permettant de développer, l'expérience en action des publics visés [Masciotra 2010]. Celle-ci fera appel à une approche sensible et sensorielle afin de développer les compétences adaptatives nécessaires pour faire face aux risques météo-climatiques.

Méthodes

Ainsi trois types d'outils seront développés en lien avec les utilisateurs potentiels (associations et enseignants, collectivités territoriales, prévisionnistes) dans le but de comprendre la genèse et d'expérimenter les multiples facettes des crises hydro-météorologiques que ce soit du point de vue des gestionnaires du risque ou des populations impactées. Les trois types d'outils ludiques et artistiques proposés feront chacun l'objet d'une tâche spécifique ; une quatrième tâche sera dédiée à la conceptualisation et la mise en œuvre du protocole expérimental accompagnant le déploiement des outils et permettant l'évaluation de leurs effets sur les participants volontaires.

5.2.1 Tâche 1 : Création d'un jeu sérieux en ligne dédié au grand public

Les jeux sérieux sont utilisés pour leur pédagogie interactive, pour enseigner des mécanismes complexes de manière active. Ils sont aussi souvent utilisés pour engager le grand public et les décideurs, les faire discuter ou coopérer pour prendre de meilleures décisions [Becu 2020]. Une grande partie de ces jeux nécessitent de nombreux joueurs et un animateur, et imposent donc une certaine logistique.

Dans le cadre de cette tâche, nous visons le grand public, les habitants des zones exposées au risque de ruissellement et d'inondations soudaines et torrentielles dans l'objectif de mieux les préparer à adopter des comportements prudents, notamment lorsqu'ils sont en voiture en période de pluies extrêmes, et malgré les dilemmes émotionnels que peuvent susciter ce genre de situation.

L'objectif est de proposer un jeu informatisé relativement simple et ludique, accessible gratuitement en ligne et jouable en solo. La réalisation de ce jeu s'appuiera sur deux modèles en cours de développement en matière de simulation multi-agents du risque de crues rapides. Le modèle à vocation de recherche DeBRIEFF, décrit précédemment, vise à prévoir les risques de pertes humaines découlant des réponses comportementales des populations confrontées à des épisodes de crues rapides. Le second modèle, nommé Vigiflood [Adam et Andonoff 2019], est un jeu sérieux très simple qui permet à un joueur de prendre le rôle d'un prévisionniste pour décider d'un niveau de vigilance météorologique (vert/jaune/orange/rouge) sur la base d'une information déterministe de pluie, et tirer des leçons des échecs et réussites lors de ses essais de prévision précédents. En retour le joueur obtient une information sur les conséquences de ses décisions sur le niveau de confiance des habitants qui évolue avec leur perception de l'historique des fausses alertes.

Le développement de ce jeu fera appel à toute l'expertise des enseignants et élèves ingénieurs de l'école Nationale de Météorologie (ENM) et prévisionnistes-conseil opérationnels de Météo-France. Cette expertise permettra de proposer un catalogue de situations météorologiques réalistes déclinées sous des formes probabilistes et déterministes et des contenus de message de vigilance permettant de tester nos hypothèses en matière d'information incarnée. L'expérience des chercheurs en sciences sociales et comportementales servira à proposer des scénarios cadrant le contexte de la prise de décision pour maîtriser les conditions du test de l'influence des différentes variables d'intérêt sur le choix des joueurs. Pour favoriser l'immersion, l'outil pourra intégrer plusieurs scénarios comprenant des éléments plus ou moins spécifiques du territoire, ainsi plus le scénario sera proche du vécu des personnes et plus il sera engageant (mais aussi spécifique à ce territoire). La variété des scénarios ainsi que l'intégration d'une composante ludique, notamment par un travail en collaboration avec des écoles et des stagiaires issus de formations en design, devra permettre de susciter l'envie de répéter l'expérience de jeu plusieurs fois.

Le jeu sera d'abord testé auprès d'étudiants de l'université et d'élèves de l'ENM avant d'être déployé dans le cadre du protocole expérimental défini à la tâche 4.

5.2.2 Tâche 2 : Développement d'un kit de jeu de simulation participative à destination d'un public de décideurs/gestionnaires de crise

Cette deuxième tâche est dédiée à assurer l'amélioration et la transférabilité du jeu ANYCaRE précédemment décrit. Les principales améliorations consisteront à rendre le jeu plus modulable en différenciant le « squelette », qui définira une trame pérenne d'une expérimentation à l'autre, des briques interchangeable d'information sur l'aléa et la vulnérabilité du territoire à gérer. Cette partie modulable permettra d'adapter la simulation aux besoins des usagers et à ceux liés à la mise en œuvre du protocole expérimental pour le test de nos hypothèses scientifiques. L'idée serait de proposer un catalogue de situations de crise parmi lesquelles choisir à chaque nouvelle utilisation du jeu.

Ces améliorations seront construites sur la base d'une élicitation des besoins des potentiels usagers (sur les territoires partenaires) et, comme pour la tâche 1, feront appel à l'expertise conjointe des experts prévisionnistes et des chercheurs en sciences sociales et comportementales. Les nouvelles versions du jeu seront testées auprès d'un public étudiant avant leur mise en œuvre avec des volontaires dans le cadre du protocole expérimental défini par la tâche 4.

Si le premier jeu permettra de tester plus aisément et de manière robustes les hypothèses de psychologie cognitive, l'effet de ce type de simulation sera sans doute plus dur à quantifier tant les conditions seront variables selon le profil et l'expérience des divers participants et du modérateur. Il s'agira alors d'évaluer les résultats du processus au travers de ses effets sur les participants tels que l'évolution de leurs représentations, de leurs savoir-faire face aux risques hydro-climatiques ou bien encore les différences en matière de décision collective et de confiance dans celles-ci selon les différents modes de communication.

5.2.3 Tâche 3 : Création d'un spectacle déambulatoire philosophico-poétique basés sur des ateliers participatifs avec le public

L'idée est d'aller à la quête des émotions suscitées par les crues, des peurs, des traumatismes, des bons et mauvais réflexes. Le théâtre de rue, la poésie, le conte et les ateliers d'écriture seront convoqués pour questionner et réfléchir sur les risques et les comportements qui peuvent aggraver les situations. Ces formes artistiques seront déployées auprès d'un grand nombre de personnes via les écoles (à partir de 8 ans), collèges et lycées et les associations culturelles, centres de loisirs, MJC et centres sociaux.

L'objet artistique final prendra la forme d'un spectacle déambulatoire philosophico-poétique en inauguration d'une exposition mobile de panneaux, à vocation artistique et explicative. Ces panneaux seront conçus à partir des temps de rencontres des populations, des données qualitatives (issues d'entretiens) collectées jusqu'alors par les chercheurs et des temps de création partagée avec des partenaires d'un territoire-test situé en Haute-Loire, des partenaires locaux ayant déjà manifesté leur intérêt pour le projet. Une fois « joué » avec les communes et collectivités territoriales partenaires, cet « objet artistique » pourra être proposé à l'ensemble des communes désireuses de l'acquérir.

Il s'agit de mettre en place un événement artistique qui installera, de par son processus, une réflexion durable sur la question de l'adaptation des comportements aux risques météorologiques. L'idée est d'une part, d'allier le temps bref du spectacle et le temps long de la réflexion, i) par un travail de création partagée avec le public visé : entretiens de sensibilisation, de récolte des représentations et des savoirs « populaires », ateliers d'écriture, performances participatives (montée en puissance par la sollicitation active des publics visés), ii) par une installation (pérenne ou temporaire) qui réactive la prise de conscience qui a pu s'opérer au moment du spectacle et de son processus d'émergence. D'autre part, il s'agira de mettre en jeu les différentes cordes artistiques dont le collectif d'artiste partenaire dispose :

- Le travail personnel de création de chacun de ses membres dans des champs aussi différents que théâtre, poésie, conte, photographie, arts visuels, musique...
- La capacité à mettre en œuvre des créations partagées, c'est-à-dire à mobiliser la population au cours d'ateliers d'écriture et de performances poétiques, d'ateliers

d'invention de récits prospectifs,

- La construction du spectacle et la conception de l'exposition pérenne et/ou temporaire qui découlera du processus : panneaux fixes installés dans la ville (ou village) concernée.

5.2.4 Tâche 4 : Réalisation d'un protocole expérimental permettant de tester l'efficacité de différents modes de communication sur les comportements à risque

Pour accompagner la mise en œuvre des trois outils précédemment décrits et tester à court et moyen termes leurs effets en matière de représentations, de savoir-être et de savoir-faire face aux risques hydro-climatiques, un protocole expérimental basé sur les fondements de la psychologie cognitive et comportementale sera développé de façon à mesurer l'impact de ces techniques sur la mémoire de l'événement, les capacités à faire face (*coping*) et de résilience et sur la prise de décision des participants. Chaque méthode sera comparée sur ces dimensions à un groupe contrôle apparié.

Au niveau méthodologique, l'objectif sera de tester l'efficacité de différents modes de communication sur les comportements à risque sur les trois moyens d'action (à destination du grand public et des professionnels) décrits plus haut.

La première variable correspond aux tests des nouvelles normes qui visent à fournir des informations probabilistes plutôt que déterministes aux individus. Ces mesures sont plus précises et plus réalistes par rapport à l'évaluation des risques réels (comparativement à une information déterministe en tout ou rien). Néanmoins, à notre connaissance, la délivrance de ce type d'information sur les comportements à risque n'a jamais été évaluée à ce jour. Délivrer un message incertain pourrait paradoxalement réduire la perception du risque par les usagers, ce qui serait à l'inverse du seul but recherché par les campagnes d'information ! L'objectif des études en sciences psychologiques impliquées dans le projet sera donc d'évaluer au niveau fondamental (i.e. en laboratoire, via des expériences comportementales et de neuro-imagerie) et appliqué (via les 3 méthodes de communication présentées plus haut) l'impact de cette première variable sur la perception des risques.

La seconde variable aura pour objectif de tester la tendance à l'action sur la mise en œuvre effective de comportements de prévention. Plus précisément, dans le cadre de la

théorie de la cognition incarnée (*embodiment theory*) nous évaluerons l'émission de messages purement informatifs (e.g. le risque est de X% d'être exposé à une inondation létale) versus des messages directifs induisant une tendance à l'action (e.g. le risque d'une inondation létale est imminent, vous devez quitter les lieux). Enfin, de façon complémentaire et en lien avec les risques létaux observés, nous explorerons une troisième variable : la modulation de la perception des risques lorsque l'individu est dans sa voiture (ou directement exposé) à l'inondation. Nous supposons que les individus en voiture auront une perception réduite (et à quantifier) de la perception des risques. Les interactions avec les deux autres variables seront testées de façon exploratoire.

Au niveau psychologique, les expériences comportementales in situ (serious games, etc.) seront réalisées sur un échantillon représentatif d'au moins 300 participants de façon à obtenir des p-values stabilisées ainsi qu'une puissance d'effet publiable dans un environnement moins contrôlé [Schönbrodt et Perugini 2013]. Sur la même base de calcul de puissance statistique en milieu contrôlé, les expériences comportementales réalisées en laboratoire seront réalisées sur au moins 100 sujets par expérience. Ces chiffres s'entendent évidemment avec un design expérimental en intra-sujet. Afin de contrôler le niveau de stress et d'anxiété associé à chacune des expériences, nous utiliserons des questionnaires validés et standardisés en psychologie clinique et en psychiatrie (après un l'état de l'art au début du projet) qui permettront d'analyser ces covariables importantes dans le processus de prise de décision.

Ainsi ce projet constitue un pas de plus vers l'usage de la simulation participative et des jeux sérieux, que je considère comme des outils de médiation très prometteurs, pour faire dialoguer les experts du climat, les scientifiques spécialistes de ses impacts sociétaux et les membres de la société qu'ils soient décideurs institutionnels ou simples citoyens. Les pistes de recherche les plus récentes et les plus exploratoires que je propose d'aborder rapidement pour terminer ce mémoire s'intéressent justement au développement de ce type d'outil dans l'objectif de mieux cerner les besoins en services climatiques dans des régions du globe particulièrement vulnérables aux aléas météorologiques et climatiques.

5.3 Exploration à venir autour de la notion de services climatiques en Afrique de l'Ouest

COLLABORATEURS : S. Anquetin, J.-D. Creutin, A. Diedhiou, B. Hingray, C. Lavaysse (IGE), S. Mathy (Laboratoire d'Economie Appliquée de Grenoble-GAEL), C. Cholez et P. Trompette (PACTE), E. Bonnet (Pôle de Recherche pour la Diffusion de l'Information Géographique-PRODIG).

PROGRAMMES DE RECHERCHE : LMI Nexus, ANR STEWARD.

Mon ancrage à l'Institut des Géosciences de L'Environnement et les récentes évolutions thématiques de l'équipe HMCIS que je co-dirige m'encourage à explorer de nouvelles questions et terrains de recherche en lien avec la définition de services climatiques en Afrique de l'Ouest dans le cadre de deux nouveaux projets, celui du Laboratoire Mixte International (LMI) Nexus et de l'ANR STEWARD.

L'objectif du projet STEWARD vise à améliorer la prédictibilité des deux principaux risques liés aux conditions météorologiques qui affectent les populations d'Afrique de l'Ouest. Le premier risque est lié aux événements hydro-météorologiques intenses, qui comprennent des périodes humides et sèches, des tempêtes et des inondations fluviales. Ainsi au cours des dernières décennies, les précipitations extrêmes ont été responsables du plus grand nombre de décès en Afrique de l'Ouest (OMM, 2015). Le deuxième risque, généralement associé à l'aggravation des problèmes de santé, est lié à la combinaison des vagues de chaleur et des tempêtes de poussière. En effet, l'exposition à ces deux phénomènes peut aggraver les problèmes respiratoires en irritant les bronches et en provoquant des poussées d'asthme, augmentant le et est le risque de développer des méningites bactériennes. Ainsi, la région du Sahel, en Afrique de l'Ouest, compte le plus grand nombre de cas de méningite bactérienne au monde [Sultan *et al.* 2005].

En se focalisant sur les agglomérations d'Abidjan en Côte d'Ivoire et de Dakar au Sénégal, il s'agira de constituer et d'analyser une base de données à double entrées, permettant de coupler les observations associées aux occurrences récentes (sur les 20 dernières années) des phénomènes météorologiques étudiés et des impacts sanitaires subies par les populations. L'objectif à terme est de produire des indicateurs de risque utilisables pour la définition de systèmes d'alerte précoce de la population.

Sur la base d'une revue de littérature, il s'agira dans un premier temps d'identifier tous les impacts sanitaires potentiels des phénomènes météorologiques d'intérêt, avant

d'explorer les bases de données existantes issues des instances nationales et internationale. Cette première étape permettra d'évaluer la pertinence des données disponibles et d'identifier la résolution spatiale et temporelle la plus adéquate pour conduire des analyses croisées des paramètres physiques, sociaux et sanitaires. Comme pour mes précédentes recherches traitant du sujet de la prédictibilité des événements à forts impacts, il s'agira ici également, mais dans un contexte socio-culturel qui m'est encore inconnu, d'identifier les facteurs de vulnérabilités et les variables proxy qui peuvent expliquer l'occurrence et la sévérité des impacts recensés. Cette recherche fera appel aux techniques classiques d'analyse statistiques des observations issues de la base de données d'impact auxquelles seront associées des méthodes plus qualitatives via l'usage d'entretiens semi-directifs auprès des acteurs de la gestion du risque et éventuellement d'enquêtes quantitatives auprès des populations dans le cas où les données feraient défaut à la résolution spatiale et temporelles choisies.

Etant donné mon manque de connaissance et d'expérience du terrain, ma contribution sera plutôt d'ordre méthodologique et s'entend bien entendu dans le cadre d'une collaboration rapprochée avec les chercheurs de l'IRD et les institutions sanitaires et scientifiques locales.

Dans le cadre du LMI Nexus, les recherches partenariales menées avec nos partenaires de Côte d'Ivoire visent à adopter une approche holistique en s'attachant à comprendre l'état du nexus eau-énergie-agriculture en Afrique de l'ouest et ses interactions avec le changement climatique. L'objectif final est de contribuer à la définition et à l'émergence de services climatiques pour accompagner les économies locales et les politiques publiques d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, d'adaptation pour une agriculture durable et de développement des énergies renouvelables.

Dans le cadre de ce LMI et du montage en cours d'un projet ANR, j'envisage ma participation à un premier chantier de recherche interdisciplinaire portant sur l'accès à l'électricité via les mini-réseaux d'électricité renouvelable (100% solaire).

Les collaborations avec mes collègues d'HMCIS mais également avec une équipe de sociologues de PACTE viseront notamment à appréhender et modéliser la demande en services énergétiques dans les contextes spécifiques étudiés et dans une perspective de co-développement. Il s'agira notamment de :

- Partir de la connaissance des usagers et raisonner des "patrons de demandes" (usages domestiques, productifs, 'sociaux' etc.), leurs facteurs de variabilités (tem-

porels, météorologiques), les besoins en capacité correspondants (puissance, taux d'usage) ;

- Raisonner la correspondance entre ces patterns d'usage et les types de production (production de base/variable), en lien avec leur niveau de fiabilité (échelle de variabilités et correspondance à des offres) ; évaluer l'adaptabilité (report ou effacements) des différents types d'usages au regard de l'intermittence et la prévisibilité de la ressource ;
- Evaluer l'intérêt de services climatiques (prévision court et moyen termes) en lien avec la ressource et la demande pour accompagner l'aide à la décision dans l'allocation des ressources et la gestion du mini-réseau de façon à améliorer la fiabilité, la satisfaction des usages et l'utilisation de la ressource disponible.

Ma participation dans le cadre de ce travail exploratoire portera plus spécifiquement sur le développement de simulations participatives ou jeux sérieux comme moyen d'expérimenter avec la population les scénarios de variabilité du climat, de la ressource et les conséquences de leurs décisions d'utilisation. L'objectif serait d'identifier les informations climatiques à fournir aux usagers pour une utilisation optimisée de la ressource à l'échelle du village ; ainsi que soutenir l'appropriation de comportements vertueux (économie d'énergie, fiabilité des équipements) et de formes de gouvernance adaptées (accorder/prévoir les plages de consommation à celles de disponibilité de la ressource).

Pour conclure, j'évoquerai ici mon implication à titre personnel que ce soit en tant que citoyenne engagée ou qu'élue de ma commune en charge des questions de transition écologique et de participation citoyenne. Ainsi, mon plus grand souhait dans les années à venir est de concilier mon engagement de terrain avec le développement d'une recherche-action. Mon objectif est donc de continuer à étudier et à lever les freins à l'évolution des pratiques quotidiennes dans le domaine de la mitigation et de l'adaptation aux risques climatiques, en identifiant les leviers d'action pour une articulation optimale entre initiatives locales et globales favorisant des modes de vie plus durables pour les Hommes et les écosystèmes. Si les échelons individuels et locaux sont des maillons majeurs de la conduite du changement, les actions à ce niveau doivent être encouragées par les politiques publiques et l'investissement aux échelles supérieures, notamment pour éviter d'accroître, si ce n'est réduire, les inégalités sociales et les vulnérabilités économiques et sanitaires.

Bibliographie

- H. AARTS et A. DIJKSTERHUIS : Habits as knowledge structures : Automaticity in goal-directed behavior. *Journal of personality and social psychology*, 78(1):53, 2000.
- C. ADAM et E. ANDONOFF : Vigiflood : a serious game for understanding the challenges of flood risk communication. *In ISCRAM 2019*, Valencia, Spain, May 2019.
- I. AJZEN : The theory of planned behaviour. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50(2):179–211, 1991.
- M. AMALRIC, B. ANSELME, N. BECU, E. DELAY, N. MARILLEAU, C. PIGNON-MUSSAUD et F. ROUSSEAU : Sensibiliser au risque de submersion marine par le jeu ou faut-il qu’un jeu soit spatialement réaliste pour être efficace ? *Sci. du jeu*, 8:1–22, 2017.
- L. AN : Modeling human decisions in coupled human and natural systems : Review of agent-based models. *Ecological Modelling*, 229:25–36, 2012.
- J. ANDERSON : *Constraint-Directed Improvisation for Everyday Activities*. Thèse de doctorat, University of Manitoba, Department of Computer Science, 1995.
- I. ANDRÉ-POYAUD, S. CHARDONNEL et L. CHARLEUX : Mobility and activity patterns of individuals and parenting couples in the metropolitan area of grenoble (France). Rapport technique, University Grenoble Alpes, 2016.
- I. ANDRÉ-POYAUD, S. CHARDONNEL, L. CHARLEUX et K. TABAKA : La mobilité au cœur des emplois du temps des citoyens. *In 2ème Rencontres Internationales d’Urbanisme*, Grenoble, 2006.
- S. ANQUETIN, I. BRAUD, O. VANNIER, P. VIALLET, B. BOUDEVILLAIN, J.-D. CREUTIN et C. MANUS : Sensitivity of the hydrological response to the variability of rainfall fields and soils for the gard 2002 flash-flood event. *Journal of Hydrology*, 394:134–147, 2010.

-
- S. ANQUETIN, J.-D. CREUTIN, G. DELRIEU, V. DUCROQ, E. GAUME et I. RUIN : Increasing the forecasting lead-time of weather driven flash-floods. Rapport final H01/812/02/D9056/AG/ct, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, janvier 2004.
- S. T. ASHLEY et W. S. ASHLEY : Flood fatalities in the united states. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(3):805–818, 2008. URL <http://dx.doi.org/10.1175/2007JAMC1611.1>.
- H. ASTOLA, M. MOLINIER, M. SIMONS et P. SUSILA : Forest stem volume and storm damage mapping in finland and russia. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pages 2309–2312, Quebec City, Canada, 13-18 July 2014.
- K. W. AXHAUSEN, A. ZIMMERMANN, S. SCHÖNFELDER, G. RINDSFÜSER et T. HAUPT : Observing the rhythms of daily life : A six-week travel diary. *Transportation*, 29(2):95–124, 2002.
- D. AZAR et D. RAIN : Identifying population vulnerable to hydrological hazards in San Juan, Puerto Rico. *GeoJournal*, 69(1-2):23–43, 2007.
- J. S. BECKER, H. L. TAYLOR, B. J. DOODY, K. C. WRIGHT, E. GRUNTFEST et D. WEBBER : A review of people’s behavior in and around floodwater. *Weather, Climate, and Society*, 7(4):321–332, 2015. URL <http://dx.doi.org/10.1175/WCAS-D-14-00030.1>.
- N. BECU : *Les courants d’influence et la pratique de la simulation participative*. Mémoire d’habilitation à diriger les recherches, La Rochelle Université, 2020.
- M. BERTRAN ROJO, E. BECK et C. LUTOFF : The street as an area of human exposure in an earthquake aftermath : the case of Lorca, Spain, 2011. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(4):581–594, 2017.
- G. BLÖSCHL et M. SIVAPALAN : Scale issues in hydrological modelling : a review. *Hydrological processes*, 9(3-4):251–290, 1995.
- E. BOISSON, B. WILHELM, E. GARNIER, A. MÉLO, S. ANQUETIN et I. RUIN : Geo-historical analysis of flood impacts in a large alpine catchment (Arve river, France, 1850 – 2015). *Submitted to Regional Environmental Change*, 2020.
- M. BORGA, P. BOSCOLO, F. ZANON et M. SANGATI : Hydrometeorological analysis of the 29 august 2003 flash flood in the eastern italian alps. *Journal of hydrometeorology*, 8(5):1049–1067, 2007.
- M. BORGA, F. COMITI, I. RUIN et F. MARRA : Forensic analysis of flash flood response. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Water*, 6(2):e1338, 2019.

- E.A. BOYLE, T. HAINES, T.M. CONNOLLY, G. GRAY, J. EARP, M. OTT, T. LIM, M. NINAUS, C. RIBEIRO et J. PEREIRA : An update to the systematic literature review of empirical evidence of the impacts and outcomes of computer games and serious games. *Comput. Educ.*, 94:178–192, 2016.
- F. BRANGER, I. BRAUD, S. DEBIONNE, P. VIALLET, J. DEHOTIN, H. HENINE, Y. NEDELEC et S. : ANQUETIN : Towards multi-scale integrated hydrological models using the liquid® framework : Overview of the concepts and first application examples. *Environmental Modeling Software*, 25:1672–1681, 2010.
- I. BRAUD, H. ROUX, S. ANQUETIN, M. M. MAUBOURGUET, C. MANUS, P. VIALLET et D DARTUS : The use of distributed hydrological models for the gard 2002 flash flood event : Analysis of associated hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 394:162–181, 2010.
- I. BRAUD, B. VINCENDON, S. ANQUETIN, V. DUCROCQ et J.-D. CREUTIN : Enjeux de la prévision des crues rapides. In C. LUTOFF et S. DURAND, éditeurs : *Mobilités face aux événements hydrométéorologiques extrêmes 1. Définition des échelles de référence*. ISTE Editions Ltd, London, 2018.
- L. BREIMAN : Random forests. *Machine Learning*, 45:5–32, 2001.
- P. BROUSSEAU, Y. SEITY, D. RICARD et J. LÉGER : Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(699):2231–2243, 2016.
- P. BUBECK, W. J. W. BOTZEN et J. C. AERTS : A review of risk perceptions and other factors that influence flood mitigation behavior. *Risk Analysis : An International Journal*, 32(9):1481–1495, 2012.
- M. CALIANNO, I RUIN et J. J. GOURLEY : Supplementing flash flood reports with impact classifications. *Journal of Hydrology*, 477:1–16, 2013. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169412008396>.
- T. CANNON : Vulnerability analysis and the explanation of “natural” disasters. In A. VARLEY, éditeur : *Disasters, Development and Environment*, pages 13–30. J. Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1994.
- K.M. CARSELL, N.D. PINGEL et D.T. FORD : Quantifying the benefit of a flood warning system. *Nat. Hazard. Rev.*, 5(3):131–140, 2004.
- D. W. CASH, W. N. ADGER, F. BERKES, P. GARDEN, L. LEBEL, P. OLSSON, L. PRITCHARD et O. YOUNG : Scale and cross-scale dynamics : Governance and information in a multilevel world. *Ecology and Society*, 11(2), 2006.

-
- C. CAVALIÈRE : *Analyser des tweets géolocalisés pour explorer les réponses sociales face aux phénomènes météorologiques extrêmes : Réflexions épistémologiques et verrous méthodologiques*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France, 2019.
- C. CAVALIÈRE, P-A. DAVOINE, C. LUTOFF et I. RUIN : Les tweets géolocalisés comme moyen d'observation des événements naturels extrêmes. premières spécifications. In C. LUTOFF et S. DURAND, éditeurs : *Mobilité face aux événements hydrométéorologiques extrêmes 2. Rythmes d'adaptation*, pages 165–192. ISTE Editions Ltd, London, 2020.
- J. CHAKRABORTY, G. A TOBIN et B. E MONTZ : Population evacuation : assessing spatial variability in geophysical risk and social vulnerability to natural hazards. *Natural Hazards Review*, 6(1):23–33, 2005.
- S. CHARDONNEL : Time-geography : Individuals in time and space. In L. SANDERS, éditeur : *Models in Spatial Analysis*, pages 97–126. Wiley Online Library, 2007.
- A. F. CLARK et S. T. DOHERTY : A multi-instrumented approach to observing the activity rescheduling decision process. *Transportation*, 37(1):165–181, 2010.
- G. E. CLARK, S. C. MOSER, S. J. RATICK, K. DOW, W. B. MEYER, S. EMANI, W. JIN, J. X. KASPERSON, R. E. KASPERSON et H. E. SCHWARZ : Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms : The case of revere, MA., USA. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 3(1):59–82, 1998. URL <https://doi.org/10.1023/A:1009609710795>.
- L. COATES : Flood fatalities in australian, 1788-1996. *Australian Geographer*, 30(3):391–408, 1999.
- M. COOLS et L. CREEMERS : The dual role of weather forecasts on changes in activity-travel behavior. *Journal of Transport Geography*, 28:167–175, 2013.
- J.-D. CREUTIN : Les échelles temporelles et spatiales du couplage. Communication orale, Décembre 2001.
- J.-D. CREUTIN et M. BORGA : Radar hydrology modifies the monitoring of flash-flood hazard. *Hydrological processes*, 17(7):1453–1456, 2003.
- J.-D. CREUTIN, M. BORGA, E. GRUNTFEST, C. LUTOFF, D. ZOCCATELLI et I. RUIN : A space and time framework for analyzing human anticipation of flash floods. *Journal of Hydrology*, 482:14–24, 2013.

- J.-D. CREUTIN, M. BORGA, C. LUTOFF, A. SCOLOBIG, I. RUIN et L. CRETON-CAZANAVE : Catchment dynamics and social response during flash floods : The potential of radar rainfall monitoring for warning procedures. *Meteorological Applications*, 16:115–125, 2009.
- I. G. CULLEN et V. GODSON : Urban networks : The structure of activity patterns. *Progress in Planning*, 4:1–96, 1975.
- S. CUTTER : GI science, disasters, and emergency management. *Transaction in GIS*, 7 (4):439–445, 2003.
- S. L. CUTTER, B. J. BORUFF et W. L. SHIRLEY : Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84:242–261, 2003.
- S. L. CUTTER, J. T. MITCHELL et M. S. SCOTT : Revealing the vulnerability of people and places : A case study of georgetown county, South Carolina. *Annals of the Association of the American Geographers*, 90(4):713–737, 2000.
- A. R. DAMASIO : Descartes' error and the future of human life. *Scientific American*, 271 (4):144–144, 1994.
- D. DAMM et S.R. LERMAN : A theory of activity scheduling behavior. *Environment and Planning A*, 13(6):703–718, 1981.
- N. DASH et H. GLADWIN : Evacuation decision making and behavioral responses : Individual and household. *Natural Hazards Review*, 8(3):69–77, 2007.
- S. DEBIONNE, I. RUIN, S. SHABOU, C. LUTOFF et J.-D. CREUTIN : Assessment of commuters' daily exposure to flash flooding over the roads of the Gard region, France. *Journal of hydrology*, 541:636–648, 2016.
- F. DEDIEU : Alerte et catastrophe : le cas de la tempête de 1999, un risque scélérat. *Sociologie du Travail*, 51(3):379–401, 2009.
- F. DEDIEU : *Une catastrophe ordinaire : la tempête du 27 décembre 1999*, volume 30. Éditions de l'École des hautes études en sciences sociales, 2013.
- G. DELRIEU, V. DUCROCQ, E. GAUME, J. NICOL, O. PAYRASTRE, E. YATES, P.-E. KIRSTETTER, H. ANDRIEU, P.-A. AYRAL, C. BOUVIER, J.-D. CREUTIN, M. LIVET, S. ANQUETIN, M. LANG, L. NEPPEL, C. OBLED, J. Parent-du CHATELET, G.-M. SAULNIER, A. WALPERSDORF et W. WOBROCK : The catastrophic flash-flood event of 8-9 september 2002 in the gard region, France : a first case study for the Cévennes-Vivarais mediterranean hydro-meteorological observatory. *Journal of Hydrometeorology*, 6:34–52, 2005.

-
- G. DELRIEU, I. RUIN et AL. : Inter-disciplinary post-event surveys to disentangle hazard from vulnerability in the impacts of Mediterranean flash-flood events. In S. THIÉBAULT et J.P. MOATTI, éditeurs : *The Mediterranean Region under Climate Change : A scientific update*, pages 319–326. IRD Edition, Marseille, 2016.
- M. DIAKAKIS et G. DELIGIANNAKIS : Vehicle-related flood fatalities in Greece. *Environmental Hazards*, 12(3-4):278–290, 2013. URL <http://dx.doi.org/10.1080/17477891.2013.832651>.
- E. W. DIJKSTRA : A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1):269–271, 1959.
- S.T. DOHERTY et E. J. MILLER : A computerized household activity scheduling survey. *Transportation*, 27(1):75–97, 2000.
- S. DOOCY, A. DANIELS, S. MURRAY et T.D. KIRSCH : The human impact of floods : a historical review of events 1980-2009 and systematic literature review. *Plos Currents Disasters*, 2013.
- T. E DRABEK : Understanding disaster warning responses. *The Social Science Journal*, 36(3):515–523, 1999.
- T.E. DRABEK : The social factors that constrain human responses to flood warnings. In D.J. PAKER, éditeur : *Floods*, volume 1, pages 361–376. Routledge, London, 2000.
- P. DROBINSKI, V. DUCROCQ, J. T. ALLEN et AL. : Hymex, a 10-year multidisciplinary project on the mediterranean water cycle. *Bulletin American Meteorological Society*, 95(7):1063–1082, 2014.
- P. DROBINSKI, V. DUCROCQ, P. ARBOGAST et AL. : Hymex, le cycle de l’eau méditerranéen à la loupe. *Météorologie*, 80:23–36, 2013.
- S. DROBOT, C. BENIGHT et E. GRUNTFEST : Risk factors for driving into flooded roads. *Environmental Hazards*, 7(3):227–234, 2007.
- N DUBOIS et A MOCH : L’automobile et le sentiment d’être chez-soi. *Revue Européenne De Psychologie Appliquée/European Review of Applied Psychology*, 56(2):95–107, 2006.
- S. DURAND et I. RUIN : Social effects of floods on mobilities : a comparison between short-term and long-term perspectives. In C. LUTOFF et S. DURAND, éditeurs : *Mobilities Facing Hydrometeorological Extreme Events 1*, pages 23–61. ISTE Press Ltd, London, 2018.

- J. R. EISER, A. BOSTROM, I. BURTON, D. M. JOHNSTON, J. McCLURE, D. PATON et M. P. WHITE : Risk interpretation and action : A conceptual framework for responses to natural hazards. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 1:5–16, 2012.
- D. ETTEMA et T. Van Der LIPPE : Weekly rhythms in task and time allocation of households. *Transportation*, 36(2):113–129, 2009.
- D. ETTEMA, T. SCHWANEN et H. TIMMERMANS : The effect of location, mobility and socio-demographic factors on task and time allocation of households. *Transportation*, 34(1):89–105, 2007.
- A. FEKETE : Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in germany. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(2):393–403, 2009.
- M. L. FINUCANE, A. ALHAKAMI, P. SLOVIC et S. M. JOHNSON : The affect heuristic in judgments of risks and benefits. *Journal of behavioral decision making*, 13(1):1–17, 2000.
- M. L. FINUCANE et J. L. HOLUP : Risk as value : Combining affect and analysis in risk judgments. *Journal of Risk Research*, 9(2):141–164, 2006.
- P. FOSSET, A. BANOS et E. BECK : Exploring intra-urban accessibility and impacts of pollution policies with an agent-based simulation platform : Gamirod. *Systems*, 4(1):1–22, 2016.
- J. D. FRAUSTINO, B. LIU et Y. JIN : Social media use during disasters : a review of the knowledge base and gaps. Final report, Human Factors/Behavioral Sciences Division. Science and Technology Directorate, US Department of Homeland Security, College Park, MD : START., 2012.
- T. GÄRLING et K. W. AXHAUSEN : Introduction : Habitual travel choice. *Transportation*, 30(1):1–11, 2003.
- E. GARNIER : Lessons learned from the past for a better resilience to contemporary risks. *Disaster Prevention and Management : An International Journal*, 28:778–794, 2019.
- L. GARREAU, A. ADROT *et al.* : Sense as a bridge between crisis and improvisation : How do people make sense of crisis when they improvise. Rapport technique halshs-00368588, HAL Post-Print, 2009.
- E. GAUME et M. BORGA : Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods : proposal of a methodology and illustrations. *Journal of flood risk management*, 1(4):175–189, 2008.

-
- E. GAUME et C. BOUVIER : Hydrological analysis of the gard and vidourle river floods on the 8th and 9th september 2002. *Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 6:99–106, 2004.
- O. GEBHARDT, A. MÜLLER, C. KUHLCHE et AL. : Deliverable 1.2 : Report on needs and requirements from the users including advises on how to address ethical, legal and environmental issues. Rapport technique, Helmholtz Centre for Environmental Research GmbH (UFZ), <http://www.anywhere-h2020.eu/> (last access : 25 september 2020), 2017.
- M. F. GOODCHILD : Citizens as sensors : the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4):211–221, 2007.
- J. GOURLEY, J. ERLINGIS, T. SMITH, K. ORTEGA et Y. HONG : Remote collection and analysis of witness reports on flash floods. *Journal of Hydrology*, 394(1):53–62, 2010.
- J. J. GOURLEY, Y. HONG, Z. L. FLAMIG, A. ARTHUR, R. CLARK, M. CALIANNO, I. RUIN, T. ORTEL, M. E. WIECZOREK, P.-E. KIRSTETTER *et al.* : A unified flash flood database over the US. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(6):799–805, 2013.
- J.J. GOURLEY, Z.L. FLAMIG, H. VERGARA, P.E. KIRSTETTER et AL. : The flooded locations and simulated hydrographs (flash) project : Improving the tools for flash flood monitoring and prediction across the united states. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(2):361–372, 2016.
- M. GROSSETTI : L'espace à trois dimensions des phénomènes sociaux. échelles d'action et d'analyse. *SociologieS*, 2011.
- E. GRUNTFEST : What people did during the big thompson flood. Working paper 32, Natural Hazard Center, Boulder, 1977.
- L. H. GUNDERSON et C. S. HOLLING : *Barriers and Bridges to the Renewal of Ecosystems and Institutions*. Columbia University Press, New York, 1995.
- L. H. GUNDERSON et C. S. HOLLING : *Panarchy : understanding transformations in human and natural systems*. Island press, Washington D.C., 2001.
- T. HÄGERSTRAND : What about people in regional science? *Papers of the Regional Science Association*, 24:7–21, 1970.
- T. HÄGERSTRAND : Time-geography : focus on the corporeality of man, society, and environment. In United Nations University Tokyo, éditeur : *The science and praxis of complexity*, pages 193–216, 1985.

- T. HAINES, T.M. CONNOLLY, E.A. BOYLE, A. WILSON et A. RAZAK : A systematic literature review of games-based learning empirical evidence in primary education. *Comput. Educ.*, 102:202–223, 2016.
- E. HANNES, D. KUSUMASTUTI, M.L. ESPINOSA, D. JANSSENS, K. VANHOOF et G. WETS : Mental maps and travel behaviour : meanings and models. *Journal of geographical systems*, 14 (2):143–165, 2012.
- K HAYNES, L. COATES, R. Van den HONERT, A. GISSING, D. BIRDA, F. Dimer de OLIVEIRA, R. D'ARCYA, C. SMITHA et D. RADFORDA : Exploring the circumstances surrounding flood fatalities in Australia - 1900-2015 and the implications for policy and practice. *Environmental Science and Policy*, 76:165–176, 2017.
- I. HELSLOOT et A. RUITENBERG : Citizen response to disasters : a survey of literature and some practical implications. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 12:98–111, 2004.
- J. HENRY : Continuity, social change and Katrina. *Disasters*, 35:220–242, 2011.
- K. HIGUCHI : Kh coder 3 reference manual. Rapport technique, Ritsumeikan University, 2016.
- C. S. HOLLING : Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 4(1):1–23, 1973.
- C. S. HOLLING : Understanding the complexity of economic, ecological, and social system. *Ecosystems*, 4:390–405, 2001.
- C. HUGREL et R. JOUMARD : Directives et facteurs agrégés d'émission des véhicules routiers en France de 1970 à 2025. available at <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00916989>, 2006.
- T. INGOLD : *Being alive : Essays on movement, knowledge and description*. Routledge, New York, 2011.
- J.H.G. JEURING, I. RUIN, S. CHARDONNEL, J.D. CREUTIN et C. LUTOFF : Embedding hazard induced behaviour during flash flood events within the continuity of everyday life. Unpublished, 2013.
- P. JONES et M. CLARKE : The significance and measurement of variability in travel behaviour. *Transportation*, 15(1-2):65–87, 1988.
- S.N. JONKMAN : Global perspectives on loss of human life caused by floods. *Natural Hazards*, 34:151–175, 2005.

-
- S.N. JONKMAN et I. KELMAN : An analysis of causes and circumstances of flood disaster deaths. *Disasters*, 29(1):75–97, 2005.
- D. KAHNEMAN : A perspective on judgment and choice : mapping bounded rationality. *American psychologist*, 58(9):697, 2003.
- D. KAHNEMAN et B. TVERSKY : Choices, values, and frames. In *Handbook of the fundamentals of financial decision making : Part I*, pages 269–278, 1983.
- W. KELLENS, T. TERPSTRA et P. De MAEYER : Perception and communication of flood risks : a systematic review of empirical research. *Risk Analysis : An International Journal*, 33(1):24–49, 2013.
- M. KELSCH, E. CAPORALI et L. G. LANZA : Hydrometeorology of flash floods. In E.C. GRUNTFEST et J.W. HANDMER, éditeurs : *Coping with flash floods*, pages 19–35, 2001.
- R. KITAMURA : An evaluation of activity-based travel analysis. *Transportation*, 15(1-2): 9–34, 1988.
- D. A. KOLB : *Experiential Learning : Experience as The Source of Learning and Development*. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1984.
- E. LAVOUÉ : Towards social learning games. In E. POPESCU, Q. LI, R. KLAMMA, H. LEUNG et M. SPECHT, éditeurs : *Advances in Web-Based Learning*, ICWL, LNCS 7558, pages 170–179. Springer-Verlag, Berlin, 2012.
- M. K LINDELL et R. W. PERRY : *Communicating environmental risk in multiethnic communities*, volume 7. Sage Publications, 2003.
- G. F. LOEWENSTEIN, E. U. WEBER, C. K. HSEE et N. WELCH : Risk as feelings. *Psychological bulletin*, 127(2):267, 2001.
- X. LU et E. I. PAS : Socio-demographics, activity participation and travel behavior. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 33(1):1–18, 1999.
- C. LUTOFF, J.-D. CREUTIN, I. RUIN et M. BORGA : Anticipating flash-floods : Multi-scale aspects of the social response. *Journal of Hydrology*, 541:626 – 635, 2016.
- C. LUTOFF, J.-D. CREUTIN, I. RUIN et S. DUVILLARD : Les échelles d’analyse de l’exposition des mobilités face aux crues rapides. In C. LUTOFF et S. DURAND, éditeurs : *Mobilités face aux événements hydrométéorologiques extrêmes 1. Définition des échelles de référence*. ISTE Press Elsevier, London, 2018.

- L. MAPLES et J. P. TIEFENBACHER : Landscape, development, technology and drivers : The geography of drownings associated with automobiles in Texas floods, 1950- 2004. *Applied Geography*, doi :10.1016/j.apgeo.2008.09.004, 2008.
- D. MASCIOTRA : L'expérience en action : la clé d'une approche dite située. In D. MASCIOTRA et P. JONNAERT, éditeurs : *Vers une approche située en éducation. Réflexions, pratiques, recherches et standards*, volume 111, pages 13–29. Cahiers scientifiques de l'ACFAS, 2010.
- MEDDE, CEPRI et CEREMA : Le référentiel national de vulnérabilité aux inondations. Rapport technique, MEDDE and CEPRI and CEREMA, 2016.
- A. MÉLO, B. WILHELM, C. GIGUET-COVEX et F. ARNAUD : Construire une chronique d'inondations : évènements hydrologiques et histoire climatique dans le bassin de l'Arve (Alpes du nord, France) entre les XVIIIe et XXIe siècles. *Revue archéologique de l'est*, 40:411–419, 2015.
- D. MILETI : Factors related to flood warning response. In *U.S.-Italy Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts, and Management of Extreme Floods*, Perugia, November 1995.
- P.L. MOKHATARIAN et X.Y. CAO : Examining the impacts of residential self-selection on travel behaviour : A focus on methodologies. *Transportation Research B*, 42:204–228, 2008.
- R. E. MORSS, J. L. DEMUTH, H. LAZRUS, L. PALEN, C. M. BARTON, C. A. DAVIS, C. SNYDER, O. V. WILHELMI, K. M. ANDERSON, D. A. AHJEVYCH *et al.* : Hazardous weather prediction and communication in the modern information environment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(12):2653–2674, 2017.
- S. MOSS et B. EDMONDS : Sociology and simulation : Statistical and qualitative cross-validation. *American Journal of Sociology*, 110:1095–1131, 2005.
- W.J. MUHREN, GGPvd EEDE et BAVD. : Sensemaking as a methodology for iscram research : Information processing in an ongoing crisis. In *Proceedings of the 5th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM)*, pages 315 – 323. George Washington University, 2008.
- C. MUSY : Les comportements des victimes de crues rapides dans le sud de la France. Rapport de stage, Université Grenoble Alpes, 2016.
- J.-P. NAULIN, O. PAYRASTRE et E. GAUME : Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas : application to road network supervision in southern France. *Journal of Hydrology*, 486:88–99, 2013.

-
- U. NEISSER : Remembering the earthquake : direct experience vs. hearing the news. *Memory*, 4(4):7–358, 1996.
- T. NEUTENS, T. SCHWANEN et F. WITLOX : The prism of everyday life : Towards a new research agenda for time geography. *Transport reviews*, 31(1):25–47, 2011.
- F. H. NORRIS et K. KANIASTY : Reliability of delayed self-reports in disaster research. *Journal of Traumatic Stress*, 5(4):575–588, 1992.
- I. ORLANSKI : A rational subdivision of scale for atmospheric processes. *Bulletin American Meteorological Society*, 56:527–530, 1975.
- L. PALEN et K. M. ANDERSON : Crisis informatics - new data for extraordinary times. *Science*, 353(6296):224–225, 2016.
- L. PALEN, K. M. ANDERSON, G. MARK, J. MARTIN, D. SICKER, M. PALMER et D. GRUNWALD : A vision for technology-mediated support for public participation & assistance in mass emergencies & disasters. In *Proceedings of the 2010 ACM-BCS visions of computer science conference*. British Computer Society, 2010.
- L. PALEN, S. VIEWEG, J. SUTTON, S. B. LIU et A. HUGHES : Crisis informatics : Studying crisis in a networked world. In *Third International Conference on e-Social Science*, volume 7(10). Citeseer, 2007.
- K. PAPAGIANNAKI, V. KOTRONI, K. LAGOUVARDOS, I. RUIN et A. BEZES : Urban area response to flash flood–triggering rainfall, featuring human behavioral factors : The case of 22 october 2015 in Attica, Greece. *Weather, Climate, and Society*, 9(3):621–638, 2017.
- D. J. PARKER et J. W. HANDMER : The role of unofficial flood warning systems. *Journal of contingencies and crisis management*, 6(1):45–60, 1998.
- D. J. PARKER, S. J. PRIEST et S. M. TAPSELL : Understanding and enhancing the public’s behavioural response to flood warning information. *Meteorological Applications*, 16(1):103–114, 2009.
- F. PASIN et H. GIROUX : The impact of a simulation game on operations management education. *Computer and Education*, 57(1):1240–1254, 2011.
- O. PATTERSON, F. WEIL et K. PATEL : The role of community in disaster response : conceptual models. *Population Research and Policy Review*, 29(2):127–141, 2010.
- O. PAYRASTRE, E. GAUME, P. JAVELLE et AL. : Analyse hydrologique de la catastrophe du 15 juin 2010 dans la région de Draguignan (Var, France). In *Congrès SHF : Événements extrêmes fluviaux et maritimes*, pages 1–8, Paris, février 2012.

- A. J. PEARCE, M. K. STEWART et M. G. SKLASH : Storm runoff generation in humid head-water catchments : 1. where does the water come from? *Water resources research*, 22 (1263-1272), 1986.
- E. H. POWLEY : Reclaiming resilience and safety : Resilience activation in the critical period of crisis. *Human Relations*, 62:1289–1326, 2009.
- B. QUENAULT : La résilience comme injonction politique post-Xynthia. *EspacesTemps.net*, 2015.
- D.L. RONIS, J.F. YATES et J.P. KIRSCHT : Attitudes, decisions, and habits as determinants of repeated behavior. In A.R. PRATKANIS, S.J. BRECKLER et A.G. GREENWALD, éditeurs : *Attitude Structure and Function*, pages 213–239, Hillsdale, 1989.
- M. ROORDA, M. LEE-GOSSELIN, S. DOHERTY, E. MILLER et P. RONDIER : Travel-activity panel surveys in the toronto and quebec city regions : comparison of methods and preliminary results. In *2nd international colloquium on the behavioural foundations of integrated land-use and transportation models : frameworks, models and applications*, Toronto, Canada, June 12–15 2005.
- S. RUFAT, E. TATE, C. G. BURTON et A. S. MAROOF : Social vulnerability to floods : Review of case studies and implications for measurement. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14:470–486, 2015.
- I. RUIN : *Conduite à contre-courant. Les pratiques de mobilité dans le Gard : facteur de vulnérabilité aux crues rapides*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 21 novembre 2007a. URL <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00258018/fr/>.
- I. RUIN : Vulnérabilité des territoires aux crues rapides. Analyse des mobilités de population du Gard pour une amélioration des comportements en temps de crise. Rapport final, Fondation MAIF, 2007b.
- I. RUIN : Conduite à contre-courant et crues rapides, le conflit du quotidien et de l'exceptionnel. In *Annales de géographie*, volume 4, pages 419–432. Armand Colin, 2010.
- I. RUIN : Les crues rapides : problème d'échelles et de société. In A. EUZEN, C. JEANDEL et R. MOSSERI, éditeurs : *L'eau à découvert*, pages 284–285. CNRS Editions, Paris, 2015.
- I. RUIN, J.-D. CREUTIN, S. ANQUETIN, E. GRUNTFEST et C. LUTOFF : Human vulnerability to flash floods : Addressing physical exposure and behavioral questions. In *Flood Risk Management : Research and Practice*, pages 1005–1012. Taylor & Francis Group, London, 2009.

-
- I. RUIN, J.-D. CREUTIN, S. ANQUETIN et C. LUTOFF : Human exposure to flash floods - Relation between flood parameters and human vulnerability during a storm of September 2002 in Southern France. *Journal of Hydrology*, 361:199–213, 2008.
- I. RUIN, J.-C. GAILLARD et C. LUTOFF : How to get there ? Assessing motorists' flash flood risk perception on daily itineraries. *Environmental Hazards*, 7(3):235–244, 2007.
- I. RUIN et C. LUTOFF : Vulnérabilité face aux crues rapides et mobilités des populations en temps de crise. *Houille Blanche-Revue Internationale de l'Eau*, 6:114–119, 2004.
- I. RUIN, C. LUTOFF, B. BODEVILLAIN, J.-D. DOMINIQUE CREUTIN, S. ANQUETIN, M. BERTRAN-ROJO, L. BOISSIER, L. BONNIFAIT, M. BORGA, L. COLBEAU-JUSTIN et et AL. : Social and hydrological responses to extreme precipitations : An interdisciplinary strategy for postflood investigation. *Weather, Climate, and Society*, 6(1):135–153, 2014.
- I RUIN, C LUTOFF, L CRETON-CAZANAVE, S ANQUETIN, M BORGA, S CHARDONNEL, J-D CREUTIN, J GOURLEY, E GRUNTFEST, S NOBERT *et al.* : Toward a space-time framework for integrated water and society studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (10):ES89–ES91, 2012.
- I. RUIN, C. LUTOFF et S. SHABOU : Anticipating or coping : Behaviors in the face of flash floods. In F. VINET, éditeur : *Floods*, pages 259–275. Elsevier, 2017.
- I. RUIN, S. SHABOU, S. CHARDONNEL, C. LUTOFF et S. ANQUETIN : When driving to work becomes dangerous. In C. Lutoff et S. DURAND, éditeur : *Mobilities Facing Hydrometeorological Extreme Events 2*. ISTE Press Ltd, London, 2019.
- L. RYGEL, D. O'SULLIVAN et B. YARNAL : A method for constructing a social vulnerability index : An application to hurricane storm surges in a developed country. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(3):741–764, 2006.
- M. SAHARIA, P.-E. KIRSTETTER, H. VERGARA, J.J. GOURLEY, Y. HONG et M. GIROUD : Mapping flash flood severity in the united states. *Journal of Hydrometeorology*, 18(2):397–411, 2017.
- I. SALOMON et M. BEN-AKIVA : The use of the life-style concept in travel demand models. *Environment and Planning A*, 15:623–638, 1988.
- F. D. SCHÖNBRODT et M. PERUGINI : At what sample size do correlations stabilize ? *Journal of Research in Personality*, 47(5):609–612, 2013.
- K. SEDKI et L.B. DE BEAUFORT : Cognitive maps and bayesian networks for knowledge representation and reasoning. In *IEEE 24th ICTAI*, pages 1035–1040, 2012.

- S. SHABOU : Analyse des comportements de mobilité face aux crises hydrométéorologiques. Mémoire de D.E.A., Université de Nîmes, 2013.
- S. SHABOU : *Extrêmes hydro-météorologiques et exposition sur les routes : Contribution à MobRISK : modèle de simulation de l'exposition des mobilités quotidiennes aux crues rapides*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2016.
- S. SHABOU, I. RUIN, C. LUTOFF, S. CHARDONNEL et S. DEBIONNE : Assigning travel-activity patterns based on socio-demographics for flood risk assessment. In C. LUTOFF et S. DURAND, éditeurs : *Mobilities Facing Hydrometeorological Extreme Events 2*, pages 135–164. ISTE Editions Ltd, London, 2019.
- S. SHABOU, I. RUIN, C. LUTOFF, S. DEBIONNE, S. ANQUETIN, J.-D. CREUTIN et X. BEAUFILS : Mobrisk : a model for assessing the exposure of road users to flash flood events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(9):1631–1651, 2017.
- H. O. SHARIF, M. M. HOSSAIN, T. JACKSON et S. BIN-SHAFIQUE : Person-place-time analysis of vehicle fatalities caused by flash floods in Texas. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 3(4):311–323, 2012.
- E. SHOVE, F. TRENTMANN et R. WILK, éditeurs. *Time, consumption and everyday life : practice, materiality and culture*. Berg, Oxford, UK, 2009.
- H. A. SIMON : The organization of complex systems. In H. H. PATTEE, éditeur : *Hierarchy theory : the challenge of complex systems*, pages 3–27. George Braziller, New York, 1974.
- P. SLOVIC : Perception of risk. *Science*, 236:280–285, 1987.
- P. SLOVIC, M. L. FINUCANE, E. PETERS et D. G. MACGREGOR : Risk as analysis and risk as feelings : Some thoughts about affect, reason, risk, and rationality. *Risk Analysis : An International Journal*, 24(2):311–322, 2004.
- A. SOLINSKA-NOWAK, P. MAGNUSZEWSKI, M. CURL, A. FRENCH, A. KEATING, J. MOCHIZUKI, W. LIU et al. : MECHLER, R. : An overview of serious games for disaster risk management – prospects and limitations for informing actions to arrest increasing risk. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31:1013–1029, 2018.
- J. H. SORENSEN : When shall we leave ? factors affecting the timing of evacuation departures. *International journal of mass emergencies and disasters*, 9(2):153–165, 1991.
- M. SPITALAR, J. J. GOURLEY, C. LUTOFF, P. KIRSTETTER, M. BRILLY et N. CARR : Analysis of flash flood parameters and human impacts in the us from 2006 to 2012. *Journal of hydrology*, 519,:863–870, 2014.

-
- C. STAES, J. C. ORENGO, J. MALILAY, J. RULLAN et E. NOJI : Deaths due to flash-floods in Puerto-Rico, january 1992 : Implications for prevention. *International Journal of Epidemiology*, 23(5):968–975, 1994.
- M. STUDER, G. RITSCHARD, A. GABADINHO et N. S. MÜLLER : Discrepancy analysis of state sequences. *Sociological Methods and Research*, 40(3):471–510, 2011.
- B. SULTAN, K. LABADI, J. F. GUÉGAN et S. JANICOT : Climate drives the meningitis epidemics onset in west Africa. *PLoS medicine*, 2(1), 2005.
- F. TAILLANDIER et C. ADAM : Games ready to use : A serious game for teaching natural risk management. *Simulation & Gaming*, 49(4):441–470, 2018.
- S.M. TAPSELL, E.C. PENNING-ROWSSELL, S.M. TUNSTALL et T.L. WILSON : Vulnerability to flooding : Health and social dimensions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360:1511–1525, 2002.
- G. TERTI : *Forecasting of flash-flood human impacts integrating the social vulnerability dynamics*. Thèse de doctorat, University Grenoble Alpes, Grenoble, France, 2017.
- G. TERTI : DeBRIEFF simulator decisions and behavioral responses for impact estimation in flash floods multi-agent modeling for socio-ecological systems in natural hazards. Rapport technique, IGE, Université Grenoble Alpes, 2020.
- G. TERTI, I. RUIN, S. ANQUETIN et J. J. GOURLEY : Dynamic vulnerability factors for impact-based flash flood prediction. *Natural Hazards*, 79(3):1481–1497, 2015.
- G. TERTI, I. RUIN, S. ANQUETIN et J. J. GOURLEY : A situation-based analysis of flash flood fatalities in the united states. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(2):333–345, 2017.
- G. TERTI, I. RUIN, J. J. GOURLEY, P.-E. KIRSTETTER, Z. FLAMIG, J. BLANCHET, A. ARTHUR et S. ANQUETIN : Toward probabilistic prediction of flash flood human impacts. *Risk Analysis*, 39(1):140–161, 2019a.
- G. TERTI, I. RUIN, M. KALAS, I. LÁNG, A. Cangròs i ALONSO, T. SABBATINI et V. LORINI : (2019). ANYCaRE : a role-playing game to investigate crisis decision-making and communication challenges in weather-related hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(3), 2019b.
- V. TOURNON : Les adaptations comportementales sont-elles à la mesure de la sévérité des pluies ? Rapport de stage, Université Grenoble Alpes, 2015.

- H. C. TRANDIS : Values, attitudes and interpersonal behaviour. In H. E. HOWE et M. M. PAGE, éditeurs : *Nebraska Symposium on Motivation*, pages 195–259. University of Nebraska Press, Lincoln, 1980.
- F. TRENTMANN : Disruption is normal. In E. SHOVE, F. TRENTMANN et R. WILK, éditeurs : *Time, Consumption, and Everyday Life*, pages 67–84. Berg, Oxford, UK, 2009.
- P. TUBARO et A.A. CASILLI : An ethnographic seduction : How qualitative research and agent-based models can benefit each other. *Bulletin de Méthodologie Sociologique*, 106: 59–74, 2010.
- V. VAN ACKER, B. VAN WEE et F. WITLOX : When transport geography meets social psychology : toward a conceptual model of travel behaviour. *Transport Reviews*, 30 (2):219–240, 2010.
- A.E. VAN GIEZEN, E. ARENSMAN, P. SPINHOVEN et AL. : Consistency of memory for emotionally arousing events : a review of prospective and experimental studies. *Psychology Review*, 25:935–953, 2005.
- O. VANNIER, S. ANQUETIN et I. BRAUD : Investigating the role of geology in the hydrological response of mediterranean catchments prone to flash-floods : regional modelling study and process understanding. *Journal of Hydrology*, 541:158–172, 2016.
- P.-A. VERSINI, E. GAUME et H. ANDRIEU : Application of a distributed hydrological model to the design of a road inundation warning system for flash flood prone areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10:805–817, 2010.
- G. WACHINGER et O. RENN : Risk perception and natural hazards. Project report, CapHaz-Net, Stuttgart, 2010.
- J. W. WEISS, D. J. WEISS et W. EDWARDS : A descriptive multi-attribute utility model for everyday decisions. *Theory and Decision*, 68(1-2):101–114, 2010.
- J.W. WEISS, D. J. WEISS et W. EDWARDS : Big decisions, little decisions : The hierarchy of everyday life. In *A science of decision making : The legacy of Ward Edwards*, pages 451–459, 2009.
- J.W. WEISS et D.J. WEISS : Irrational : at the moment. *Synthese*, 189(1):173–183, 2012.
- F. WESTLEY, S. R. CARPENTER, W. A. BROCK, C. S. HOLLING et L. H. GUNDERSON : Why systems of people and nature are not just social and ecological systems. In L. H. GUNDERSON et C. S. HOLLING, éditeurs : *Panarchy : understanding transformations in human and natural systems*, pages 103–120, Washington D.C., 2001. Island press.

-
- P. WEYRICH, I. RUIN, G. TERTI et A. SCOLOBIG : Using serious games to evaluate the potential of social media information in warning decision-making. *International Journal of Disaster Risk Reduction (under review)*, 2020.
- B. WISNER, P. BLAIKIE, T. CANNON et I. DAVIS : *At risk : natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. Routledge, London, 2nd édition, 2004.
- WMO : WMO guidelines on multi-hazard impact-based forecast and warning services. Rapport technique, World Meteorological Organisation, 2015.
- S. WU, B. YARNAL et A. FISHER : Vulnerability of coastal communities to sea-level rise : A case study of Cape May county, New Jersey, USA. *Climate Research*, 22(3):255–270, 2002.
- S. ZAHRAN, S.D. BRODY, W.G. PEACOCK, A. VEDLITZ et H. GROVER : Social vulnerability and the natural and built environment : A model of flood casualties in Texas. *Disasters*, 32(4):537–560, 2008.

Table des figures

- 2.1 Evolution temporelle des pluies moyennes horaires et des débits lors de l'épisode pluvieux d'octobre 1993 ayant affecté l'Ardèche à Sauze Saint Martin (2450 km²) (Thèse I. Zin, 2002). Le rectangle et la courbe bleu clair désignent respectivement les pluies moyennes et la réponse lente de la rivière. Les rectangles et courbes bleu foncé indiquent les pics de pluies conditionnant la réponse rapide du débit. [Creutin 2001]. 14
- 2.2 Exemple de débits spécifiques mesurés dans le bassin versant de la rivière Fella (Italie) lors de l'épisode pluvieux du 29 août 2003 pour 3 sous-bassins de tailles différentes : (- - -) Bassin de Cucco (0.65 km²); (—) Rivière d'Uqua à Ugovizza (24 km²); (- - -) Rivière Fella à Pontebba (165 km²) [Creutin *et al.* 2009]. 15
- 2.3 Relation entre la surface du bassin versant et son temps de réponse. La droite marque la limite inférieure de la relation et indique clairement le point d'inflexion de cette relation à partir d'une surface de bassin d'environ 350 km², [Creutin *et al.* 2013]. 16
- 2.4 Échelles spatio-temporelles des bassins versant meurtriers pendant les crues de septembre 2002 dans le Gard. Les courbes rouges représentent les relations empiriques pour les bassins inférieurs et supérieur à 350 km² selon Creutin *et al.* [2013]. Les triangles et losanges représentent le croisement entre la taille des bassins versants responsables d'accidents fatals, la catégorie d'âge des victimes et le lieu de l'accident. Les objets atmosphériques en cause, tels que définis par Orlandi [1975], sont figurés par des cercles gris. Source : [Ruin *et al.* 2008, Ruin 2015]. 17

| | | |
|-----|--|----|
| 2.5 | a) Echelles d'espace et de temps caractéristiques d'un exemple de hiérarchies constituant l'écosystème des Everglades [Holling 2001] ; b) Echelles de masse et de temps caractéristiques de la hiérarchie institutionnelle composée d'un ensemble de règles propres aux sociétés humaines. A la différence des hiérarchies écologiques, celles-ci sont construites sur la base du nombre de personnes impliquées dans la constitution de ces structures et du temps de renouvellement de celles-ci [Westley <i>et al.</i> 2001, Gunderson et Holling 1995]. | 20 |
| 2.6 | Echelles et niveaux critiques pour l'analyse des interactions entre crues rapides et processus de mobilités quotidiennes et résidentielles [Lutoff <i>et al.</i> 2016, 2018]. | 21 |
| 2.7 | Modèle conceptuel des processus de décision à l'origine des pratiques quotidiennes selon Van Acker <i>et al.</i> [2010] | 25 |
| 2.8 | Exemple de réseau bayésien proposé par Hannes <i>et al.</i> [2012]. Trois types de nœuds sont représentés : les nœuds de décision (rectangles), les nœuds aléatoires (ovales) et les nœuds d'utilité (losange) | 35 |
| 3.1 | Représentation schématique de mes hypothèses et objectifs d'observation couplées des dynamiques socio-physiques | 46 |
| 3.2 | Planche photographique illustrant les campagnes de retour d'expérience sur le terrain : a) laisse de crues, b) groupe d'experts réalisant le profil topographique de la section du cours d'eau, c) photo de la crue prise par un témoin utilisée pour l'estimation des vitesses. | 48 |
| 3.3 | Grille d'entretiens semi-directifs utilisée pour collecter les témoignages post-crues [Ruin <i>et al.</i> 2014]. | 50 |
| 3.4 | Présentation sous forme d'actogramme de la succession des activités conduites, lors des crues du 15 juin 2010 dans le secteur de Draguignan (Var), par les personnes interrogées dans le cadre de la campagne de retour d'expérience. Figurent également la chronologie des pluies (selon 2 gammes d'intensité estimée à partir de données de ré-analyse de l'Observatoire Hydro-Météorologique Cévennes-Vivarais (OHMCV), le niveau de vigilance pluie-inondation de Météo-France et la chronologie des pics de crue (estimée à partir d'observations issues du retour d'expérience hydrologique) [Ruin <i>et al.</i> 2014]. | 52 |

| | | |
|-----|--|----|
| 3.5 | Evolution sur la journée du 15 juin 2010 du pourcentage de répondants selon a) le type d'activité réalisées, b) les signes environnementaux perçus et les émotions ressenties, c) la nature des communications directes et indirectes mises en oeuvre. Pour comparaison, figurent également les mesures d'intensité de pluie et les heures des pics de crues. | 54 |
| 3.6 | Délimitation des 4 phases et des principales observations associées. Source : Shabou [2013] | 55 |
| 3.7 | Représentation logarithmique des temps d'anticipation (durée séparant l'action du pic de crue) de 57 types d'actions selon la surface du bassin versant où elles ont pris place. Les actions sont classées selon la nature de la réponse représentée par la forme des points : Information (cercle), Organisation (carré), Protection (triangle) et la nature des groupes humains à l'origine de l'action représentée par la couleur du point : Institution (blanc), Communauté (gris), Individus (noir). La relation entre la surface du bassin versant et son temps de réponse est représentée par une droite montrant un point d'inflexion situé autour de la surface de 350 km ² . Source : Creutin et al. [2013] | 59 |
| 3.8 | Distribution de la variable "timeliness" des activités IOP selon le temps de réponse des bassins versants où se situe l'action. L'axe des abscisses représente les temps de réponse théoriques calculés sur la base de la relation empirique surface-temps de réponse proposée par Creutin et al. [2013] . L'axe des ordonnées donne la valeur (en pourcentage) du ratio entre temps d'anticipation d'une action et temps de réponse du bassin versant. Cette valeur informe sur la part du temps disponible réellement utilisée pour anticiper le pic de crue. L'échantillon des activités IOP considérées est issu de données collectées par entretiens semi-directifs suite à 3 événements de crues rapides : Gard (France, 2002), Malborghetto-Valbruna (Italy, 2003) et Var (France, 2010) (N = 164). Source : Lutoff et al. [2016] | 63 |
| 4.1 | Architecture du Modèle MobRISK. Sources : [Shabou 2016]* | 78 |
| 4.2 | Exemple de structure du réseau bayésien utilisé pour modéliser la décision individuelle d'entamer un trajet en voiture en fonction de l'évaluation du danger (elle-même conditionnée par la perception des signes environnementaux : niveau de précipitation et conditions de luminosité) et de l'évaluation du niveau de flexibilité de la prochaine activité prévue. Source : [Shabou 2016]* | 79 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.3 | Distribution spatiale des points de coupure potentielle selon leur niveau de susceptibilité. Le diagramme représente la répartition des niveaux de susceptibilités selon le type de route. Source : [Shabou et al. 2017]* | 81 |
| 4.4 | Distribution des points de coupure potentielle selon la surface de drainage et le niveau de susceptibilité. Source : [Shabou et al. 2017]* | 83 |
| 4.5 | Exemple de chronique de débits simulés pour un point de coupure potentielle de susceptibilité forte. Les points de couleur correspondent aux classes de probabilités affectées à chaque pas de temps (discret). Le tableau donne la correspondance entre le temps de retour des débits (annuel à cinquantennale) et les probabilités de submersion selon le niveau de susceptibilité du point considéré. | 84 |
| 4.6 | Distribution temporelle des activités les jours de semaine et de week-end en Languedoc Roussillon (données ENTID 2007-08, Source : Shabou [2016]). | 86 |
| 4.7 | Différence par rapport aux durées moyennes de transport par catégorie socio-démographique pour un jour de semaine ($D = 18mn$) et un jour de weekend ($D = 20mn$). Source : Shabou [2016]*. | 87 |
| 4.8 | Arbre de régression des séquences d'activités pour un jour (a) de semaine et (b) de week-end. La partie supérieure de la figure présente l'arbre de régression : chaque nœud représente la variable divisant les emplois du temps en deux groupes et chaque arc représente la catégorie discriminante. Une représentation visuelle des clusters d'emplois du temps des jours de semaine correspondant à chaque groupe est affichée au bas de (a) chaque activité est représentée par une couleur, et chaque ligne représente une séquence d'activités individuelle. Source : Shabou et al. [2017]* | 88 |
| 4.9 | Dynamique de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes dans le secteur d'Alès lors des crues rapides des 8-9 septembre 2002. Les barres colorées représentent les classes de probabilités de submersion des routes, la courbe en pointillé représente le trafic simulé au niveau des points de coupure et la courbe en ligne continue représente l'indice développé qui permet de mesurer le nombre d'automobilistes confrontés à des routes submergées. Source : Shabou [2016]*. | 91 |
| 4.10 | Classification des individus en fonction des effets des variables socio-démographiques sur le niveau d'exposition. Source : Shabou [2016]*. | 92 |
| 4.11 | Pourcentages de personnes exposées (taille du cercle) et niveaux moyen d'exposition (couleur) selon le croisement de scénarii attitude-type/évaluation du danger dans le cas a) d'un retour à la maison, b) d'un arrêt + attente de 60mn devant une route submergée. Source : Shabou [2016]*. | 94 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.12 | Schéma de l'approche conceptuelle proposée pour le couplage des processus physique et sociaux à l'origine des impacts humains des crues rapides. Source : Terti et al. [2015] , Terti [2017]* | 98 |
| 4.13 | Classification en 10 catégories des impacts basées sur les données SHAVE et NWS <i>Storm data</i> de 2008 à 2010. Source : Calianno et al. [2013]* | 100 |
| 4.14 | Croisement entre la classification par types d'impacts issue des données SHAVE et les variables additionnelles "densité" de population. Source : Calianno et al. [2013]* | 101 |
| 4.15 | A) Pourcentage et nombre (figurant en haut de chaque barre) de victimes de crues soudaines par type de circonstance. Ne sont représentés que les 1036 décès dont les circonstances sont explicites, la catégorie "Autres" (OT) n'est pas représentée. B) Nombre d'événements fatals (figurant en haut des barres) et de victimes/événement et par circonstances répertoriés aux USA entre 1996 et 2014. Source : Terti [2017], Terti et al. [2017]* | 104 |
| 4.16 | Pourcentage du nombre de victimes de crues éclair selon les circonstances des accidents et l'horaire du pic de crue. La couleur des barres indique le nombre de victimes associées aux événements survenus dans cet intervalle horaire et pour cette circonstance. Source : Terti [2017], Terti et al. [2017]* | 105 |
| 4.17 | Répartition par âge et genre des victimes de crues éclair selon les circonstances des décès survenus entre 1996 à 2014 (n = 1 003). Source : Terti [2017], Terti et al. [2017]* | 106 |
| 4.18 | Schéma récapitulatif du traitement des données. Les données additionnelles sont issues d'institutions nationales fournissant des données standardisées à l'échelle des Etats Unis : HSIP (Homeland Security Infrastructure Program), NHD (National Hydrography Dataset), EDAC (Earth Data Analysis Center), NWPS (National Wilderness Preservation System), Census (U.S. Census Bureau), TIGER (Topologically Integrated Geographic Encoding and Reference), FLASH (Flooded Locations and Simulated Hydrographs). Source : Terti [2017]* | 108 |
| 4.19 | a) Distribution spatiale des niveaux de risque issus de la modélisation pour la journée du 26 mai dans les états du Texas et de l'Oklahoma ; b) Distribution horaire de l'indicateur de risque dans le comté de Harris où 4 décès liés aux véhicules sont à déplorer. Source : Terti [2017]* | 113 |
| 4.20 | Cadre conceptuel des systèmes d'alerte météorologiques européens adopté pour la conception du jeu de rôle ANYCaRE. Les flèches en pointillés illustrent le flux d'informations entre les acteurs nationaux, régionaux et locaux. Source : Terti et al. [2019b]* Adapté d'après [Gebhardt et al. 2017] | 116 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.21 | Présentation et brève description du territoire considéré dans les scénarios ANYCaRE (a) scénario pluies-inondations et (b) scénario orages-vents violents. Source : Terti et al. [2019b] * | 119 |
| 4.22 | Illustration schématique de la chronologie des cycles de jeux (tours 1 à 3) et des informations fournies aux joueurs de ANYCaRE pour le (a) scénario pluies-inondations et (b) le scénario orages-vents violents. Lors du deuxième essai de chaque tour, les joueurs reçoivent des outils supplémentaires d'aide à la décision, notamment des prévisions à haute résolution et des sorties de modèles d'impacts. Source : Terti et al. [2019b] * | 121 |
| 4.23 | Illustration schématique de la chronologie des cycles de jeux (tours 1 à 4) et du territoire considéré dans le scénario ANYCaRE multirisque hybride Nat-Tech. | 122 |
| 5.1 | Spécifications du simulateur multi-agent DeBRIEFF. Formalisation des relations entre agents et des rôles attribués aux agents "citoyens". Source : [Terti 2020] | 141 |
| 5.2 | Schéma de synthèse de l'approche conceptuelle adoptée pour identifier et caractériser les événements à forts impacts sur la vallée de l'Arve. | 144 |

Dossier administratif